

DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO DEL LIXIVIADO MADURO DEL RELLENO EL HENEQUÉN TRATADO CON OXIDACIÓN AVANZADA FOTO-FENTON

ANGÉLICA TATIANA OTERO ROZO

PROYECTO DE GRADO



UNIVERSIDAD DE LA COSTA CUC

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

2012

**DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LA DEMANDA
QUÍMICA DE OXIGENO DEL LIXIVIADO MADURO DEL RELLENO EL
HENEQUÉN TRATADO CON OXIDACIÓN AVANZADA FOTO-FENTON.**

ANGÉLICA TATIANA OTERO ROZO

Proyecto de grado

Asesor

Faisal Bernal Higueta

Ingeniero Químico

UNIVERSIDAD DE LA COSTA CUC

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL

BARRANQUILLA, ATLANTICO

2012

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Barranquilla, 13 de Diciembre de 2012

DEDICATORIA

“Porque nada hay imposible para Dios” Lucas 1-37

A Dios.

Por permitirme ser quien soy, por las experiencias que he vivido, por sus bendiciones, por haberme dado salud para lograr mis objetivos. Gracias Dios mío por brindarme tu infinita bondad y amor.

A mi madre, Ana Teresa Rozo

Por darme la vida y creer en mí, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por su motivación constante y por todos los esfuerzos que ha hecho para que yo sea quien soy hoy, pero más que nada, por su amor. Te amo mamá.

A mi padre, Clímaco Otero Márquez

Por sus concejos y ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundido siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su apoyo incondicional. Gracias papá por darme una carrera para mi futuro.

A mi compañero, Henry Díaz

Por estar a mi lado, brindándome todo su amor y cariño y más que todo por tenerme mucha comprensión y paciencia, por apoyarme y ayudarme incondicionalmente en todas las etapas de este proyecto. Muchas gracias mi amor.

A mi profesor, Ing. Faisal Bernal

Por su gran apoyo y motivación para la culminación de este proyecto, por su tiempo y dedicación, por sus concejos y enseñanzas. Gracias profe.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de la Costa CUC, por darme la oportunidad de utilizar los recursos de la institución para la elaboración de mi proyecto de grado y por permitirme usar el laboratorio el CITA para desarrollar la fase experimental de esta investigación.

Agradezco especialmente a la laboratorista Érika Arbeláez por su participaron en la fase de investigación y experimentación.

RESUMEN

Este proyecto está enfocado a plantear una opción de tratamiento alternativo que permita minimizar el efecto contaminante de los lixiviados generados por la continua degradación de los residuos sólidos alojados en el ya clausurado relleno sanitario el Henequén, implementando uno de los procesos de oxidación avanzada de foto-degradación sensibilizada (Foto-Fenton), usando luz ultravioleta artificial como fuente de radiación para promover la aceleración de la mineralización de los compuestos y dichos resultados serán evaluados para determinar la eficiencia de remoción de los contaminantes en términos de la demanda química de oxígeno DQO

Palabras clave: Tratamiento, contaminante, lixiviados, residuos, relleno sanitario, oxidación avanzada, Foto-fenton, luz ultravioleta, eficiencia, remoción, DQO.

ABSTRACT

This project aims to raise an alternative treatment option that minimizes the polluting effect of leachate generated by the continuing degradation of solid waste housed in the now closed landfill El Henequen, implementing one of the advanced oxidation processes of photo-sensitized degradation (photo-Fenton), using artificial ultraviolet radiation source to promote the acceleration of the mineralization of the compounds and these results will be evaluated to determine the removal efficiency of pollutants in terms of Chemical Oxygen Demand COD

Keywords: treatment, contaminant, leachate, waste, landfill, advanced oxidation, photo-Fenton, UV light, efficiency, removal, COD.

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN | 15 |
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 16 |
| 2. JUSTIFICACIÓN | 18 |
| 3. OBJETIVOS | 19 |
| 3.1 Objetivo General | 19 |
| 3.2 Objetivos Específicos | 19 |
| 4. MARCO REFERENCIAL | 20 |
| 4.1 MARCO CONTEXTUAL | 20 |
| MARCO TEÓRICO | 22 |
| 4.1.1 Rellenos sanitarios | 22 |
| 4.1.2 Características básicas de un relleno sanitario | 22 |
| 4.1.3 Reacciones de degradación | 23 |
| 4.1.4 Maduración y Estabilización | 24 |
| 4.1.5 Composición del Lixiviado de un Relleno Sanitario | 26 |
| 4.1.6 Procesos convencionales para el tratamiento de lixiviados | 35 |
| 4.1.7 Procesos avanzados de oxidación (PAOs). | 44 |
| 4.1.8 Tipos de POAs | 49 |
| 4.1.9 Proceso UV/H ₂ O ₂ | 58 |
| 4.1.10 Procesos Fenton y Foto Fenton | 60 |
| 4.2 MARCO DE ANTECEDENTES | 66 |
| 5. DISEÑO METODOLÓGICO | 71 |
| 5.1 Fase 1 | 71 |
| 5.2 Fase 2 | 71 |
| 5.3 Fase 3 | 73 |
| 6. RESULTADOS | 74 |
| 6.1 Montaje | 74 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 6.2 | Parámetros Operativos | 78 |
| 6.3 | Evaluación de la Eficiencia | 80 |
| 6.3.1 | Físicos: | 80 |
| 6.3.2 | Fisicoquímicos: | 80 |
| 6.3.3 | Análisis Estadístico | 82 |
| 6.3.4 | Análisis De Correlación de Pearson | 84 |
| 6.3.5 | Análisis de regresión lineal | 84 |
| 6.3.6 | Correlación de Pearson | 85 |
| 6.4 | Diseño Experimental Factorial | 86 |
| 7. | ANÁLISIS DE RESULTADOS | 87 |
| 7.1 | ANÁLISIS GRÁFICO DE RESULTADOS | 105 |
| 8. | CONCLUSIONES | 110 |
| | GLOSARIO | 112 |
| | BIBLIOGRAFIA | 116 |
| | ANEXOS | |

LISTA DE TABLAS

Pág.

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Factores que influyen en las características del lixiviado de relleno sanitario. | 28 |
| Tabla 2. Composición media de un lixiviado de relleno sanitario. | 32 |
| Tabla 3. Composición media de un lixiviado de relleno sanitario según la fase operativa. | 33 |
| Tabla 4. Caracterización de los diferentes tipos de lixiviados. | 34 |
| Tabla 5. Tratamientos para los lixiviados. | 36 |
| Tabla 6. Poder de oxidación relativo al cloro. | 45 |
| Tabla 7. Constantes de velocidad (k en [l/mol-s]) del radical hidroxilo en comparación con el ozono para algunos compuestos orgánicos..... | 46 |
| Tabla 8. Tratamientos de lixiviados a vertederos mediante UV/H ₂ O ₂ , Fenton y foto fenton. | 66 |
| Tabla 9. Trabajos de tratamientos de lixiviados a vertederos mediante UV/H ₂ O ₂ , Fenton y foto Fenton..... | 67 |
| Tabla 10. Trabajos de tratamientos de lixiviados a vertederos mediante UV/H ₂ O ₂ , Fenton y foto Fenton..... | 68 |
| Tabla 11: Parámetros del montaje..... | 79 |
| Tabla 12: Resultados de parámetros fisicoquímicos del lixiviado..... | 80 |
| Tabla 13: Análisis estadístico | 82 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 14: Correlación de Pearson | 84 |
| Tabla 15: Análisis de regresión lineal | 84 |
| Tabla 16: Correlación de Pearson | 85 |
| Tabla 17: Muestra de 5mg/lit de Sulfato ferroso y 200mg/lit de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado | 87 |
| Tabla 18: Muestra de 5mg/lit de Sulfato ferroso y 300mg/lit de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado | 89 |
| Tabla 19: Muestra de 5 mg/lit de Sulfato ferroso y 500 mg/lit de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado | 91 |
| Tabla 20: Muestra de 27,5mg/lit de Sulfato ferroso y 200mg/lit de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado | 93 |
| Tabla 21: Muestra de 27,5mg/lit de Sulfato ferroso y 300mg/lit de Peróxido de Hidrogeno en 1000ml de lixiviado | 95 |
| Tabla 22: Muestra de 27,5mg/lit de Sulfato ferroso y 500mg/lit de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado | 97 |
| Tabla 23: Muestra de 50mg/lit de Sulfato ferroso y 200mg/lit de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado | 99 |
| Tabla 24: Muestra de 50mg/lit de Sulfato ferroso y 300mg/lit de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado | 101 |
| Tabla 25: Muestra de 50mg/lit de Sulfato ferroso y 500mg/lit de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado | 103 |

LISTA DE FIGURAS

Pág.

| | |
|---|----|
| Figura 1: Vista satelital del relleno Sanitario el Henequén. | 21 |
| Figura 2. Esquema simplificado del proceso de degradación anaerobia. | 26 |
| Figura 3: Proceso general de lodos activados | 41 |
| Figura 4. Clasificación de los procesos de oxidación avanzada. | 49 |
| Figura 5. Espectro de la radiación ultravioleta | 50 |
| Figura 6. Rango de aplicación de diferentes tecnologías de oxidación..... | 56 |
| Figura 7. Presentación esquemática de los procesos Foto-Fenton | 61 |
| Figura 8. Evolución de trabajos publicados a nivel mundial relacionados con el tratamiento de lixiviados de vertedero desde 1973..... | 70 |
| Figura 9 Diseño factorial experimental..... | 72 |
| Figura 10: Serpentín de vidrio | 74 |
| Figura 11: Luz artificial - lámparas UV | 75 |
| Figura 12: Montaje Completo..... | 76 |
| Figura 13 Precipitado en la solución | 77 |
| Figura 14: Sedimento de la solución | 78 |
| Figura 15 Diseño factorial experimental..... | 86 |

LISTA DE GRAFICAS

Pág.

| | |
|---|-----|
| Gráfica 1: Muestra de 5mg/lit de Sulfato ferroso y 200mg/lit de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado | 88 |
| Gráfica 2: Muestra de 5mg/lit de Sulfato ferroso y 300mg/lit de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado | 90 |
| Gráfica 3: Muestra de 5 mg/lit de Sulfato ferroso y 500 mg/lit de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado | 92 |
| Gráfica 4: Muestra de 27,5mg/lit de Sulfato ferroso y 200mg/lit de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado | 94 |
| Gráfica 5: Muestra de 27,5mg/lit de Sulfato ferroso y 300mg/lit de Peróxido de Hidrogeno en 1000ml de lixiviado | 96 |
| Gráfica 6: Muestra de 27,5mg/lit de Sulfato ferroso y 500mg/lit de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado | 98 |
| Gráfica 7: Muestra de 50mg/lit de Sulfato ferroso y 200mg/lit de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado | 100 |
| Gráfica 8: Muestra de 50mg/lit de Sulfato ferroso y 300mg/lit de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado | 102 |
| Gráfica 9: Muestra de 50mg/lit de Sulfato ferroso y 500mg/lit de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado | 104 |
| Gráfica 10: DQO INICIALES | 105 |
| Grafica 11: DQO PH BAJO | 106 |

| | |
|---|-----|
| Grafica 12: DQO Reactivos..... | 107 |
| Grafica 13: DQO Finales..... | 108 |
| Grafica 14: DQO Iniciales Vs DQO Finales | 109 |

INTRODUCCIÓN

Este proyecto de grado está enfocado en determinar la eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) del lixiviado maduro producto de la degradación de los residuos sólidos urbanos (RSU) depositados en el ya clausurado relleno el Henequén, dónde antes se llevaban las basuras de Barranquilla y sus alrededores, tratándolo mediante uno de los procesos de oxidación avanzada (POAs) Foto-Fenton basado en el empleo del Peróxido de Hidrógeno y Sulfato Ferroso, una innovadora y alternativa solución a los tratamientos convencionales que se le vienen realizando a éste tipo de líquidos.

Inicialmente se muestra el problema medioambiental que implica la generación de lixiviados en los rellenos sanitarios y la necesidad que hay de darle diferentes alternativas de tratamiento para disminuir su carga contaminante en el medio. Más adelante, se describen los conceptos básicos necesarios para entender las características generales del lixiviado desde su nacimiento en el relleno hasta los diferentes sistemas experimentales que se han investigado para crear posibles tratamientos. El diseño factorial experimental fue escogido para realizar los montajes en el reactor a escala laboratorio. La presentación y discusión de los resultados obtenidos es realizada en los apartados 6 y 7 respectivamente.

Los experimentos realizados a escala de laboratorio se llevaron a cabo en las instalaciones del laboratorio el CITA (Centro de Investigación de Tecnologías Ambientales) de la Universidad de la Costa (CUC), dentro del grupo de investigación SARS (Semillero de Aguas Residuales). Este trabajo se encuentra en el desarrollo de la línea de investigación para dicho grupo sobre los tratamientos que se pueden aplicar a las aguas residuales y a los lixiviados.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde que la especie humana empezó a existir en el planeta tierra, comenzó a utilizar los recursos naturales que su hábitat le ofrecía, incluyendo especies animales y vegetales, esta práctica se ha extendido hasta nuestros tiempos pero ahora en grandes magnitudes y para millones de personas, todo gracias a la revolución industrial, la expansión económica y la cultura basada en el consumismo imparable de usar y tirar todo aquello que ya no nos sirve, dichas costumbres han impulsado el desarrollo de la raza humana pero al mismo tiempo han dado origen al ya notable deterioro al medio ambiente que se ha encargado de demostrarnos que ya no puede con más residuos sólidos, líquidos y gaseosos, siendo el más complicados de los tres los residuos sólidos por su tamaño, composición y cantidad.

Enterrar los residuos sólidos urbanos fue y ha sido desde hace mucho tiempo la solución más práctica para “desaparecerlos”, pero ello implica la utilización de grandes áreas de tierra, inversiones económicas significativas y manejos ambientales a corto, mediano y largo plazo. Actualmente, se ha impulsado más la conciencia acerca de los daños a los recursos que causa este tipo de métodos cuando no son bien administrados y cuando la comunidad que utiliza este servicio no toma conciencia de la importancia del reciclaje, la reducción y el rehúso de los materiales.

Los rellenos sanitarios se han construido para enterrar los residuos urbanos de forma técnica y controlada, una vez que se han enterrado estos desechos, se deben aplicar métodos para minimizar los impactos que genera esta práctica. Los rellenos no poseen techos por ende cuando llueve, el agua que entra en contacto con la basura desplaza las sustancias que están contenidas dentro del residuo, sumándose a ello la degradación continua de los mismos, esta mezcla es llamada lixiviado, líquido altamente contaminante que al no ser manejado y tratado adecuadamente causa el deterioro de los suelos que atraviesa y de los cuerpos de agua subterráneas y superficiales adyacentes a estos lugares, para evitar que esto se presente, los rellenos sanitarios se diseñan con sistema de impermeabilización y redes de drenaje, los lixiviados recogidos por estos procedimientos deben ser tratados.

Este lixiviado, debido a la presencia de sustancias altamente complejas no pueden ser degradadas por microorganismos si no se les realiza con anterioridad un tratamiento que disminuya la carga contaminante que estos poseen, este hecho nos revela la importancia de que estos vertimientos reciban un tratamiento adecuado y eficaz antes de su descarga, con el fin de evitar una cadena de daños

diversos e irreversibles que puedan causar impactos ambientales negativos sobre el medio receptor.

Dentro de las opciones de tratamiento de lixiviados se han implementado Tecnologías de Oxidación Avanzada como una forma de minimizar los contaminantes recalcitrantes que se encuentran en los lixiviados viejos.

Teniendo en cuenta lo anterior, surge la siguiente pregunta ¿Cuál será la remoción de materia orgánica medida como DQO en el lixiviado del relleno sanitario El Henequén luego de someterla a un tratamiento de fotofenton?

2. JUSTIFICACIÓN

Los lixiviados que se generan en los rellenos sanitarios tienen gran cantidad de residuos orgánicos, biológicos e inorgánicos. Muchos de estos líquidos son vertidos a las distintas fuentes hídricas sin ningún tratamiento o solo con neutralización, situación que puede llegar a deteriorar el medio ambiente e impactar negativamente las aguas receptoras donde finalmente son dispuestos.

Por tal motivo surge la necesidad de la aplicación de nuevas tecnologías, capaces de operar de manera independiente o conjunta (sistemas híbridos) para el tratamiento de compuestos recalcitrantes. En éste punto, los Procesos Avanzados de Oxidación (PAOs) representan una alternativa interesante debido a la capacidad casi indiscriminada de degradar la materia orgánica a través de especies altamente oxidantes como los radicales HO^\bullet , dando como ventaja inherente la generación de un efluente mineralizado o por lo menos biocompatibilizado y con una mínima producción de residuos al final del proceso de tratamiento (PRATO.2007). Es por esta razón que en la presente investigación se evaluará el uso de los procesos avanzados de oxidación (PAOs) en el tratamiento del lixiviado maduro del ya clausurado relleno El Henequén, determinado su efectividad al momento de remover los contaminantes orgánicos recalcitrantes en términos de DQO (Demanda Química de Oxígeno), este tratamiento da como resultado la eliminación total del contaminante problema o la reducción de su concentración a un nivel tal que posibilite su descarga a una planta de tratamiento de aguas residuales sin provocar efectos negativos en el desempeño de los microorganismos presentes; la eliminación de los subproductos de degradación que puedan presentar un efecto tóxico sobre los sistemas biológicos convencionales y finalmente la eliminación de los reactivos empleados para el tratamiento que puedan causar algún nivel de inhibición en sistemas biológicos de post-tratamiento.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

- Determinar la eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno del lixiviado maduro del relleno el Henequén tratado con oxidación avanzada fotofenton

3.2 Objetivos Específicos

- Construir un reactor a escala laboratorio para realizar el proceso de evaluación para el POA- fotofenton-
- Establecer los parámetros operativos adecuados para poner en marcha una planta piloto a escala laboratorio del POA –fotofenton- para el lixiviado maduro del Henequén
- Determinar la eficiencia de remoción de contaminantes recalcitrantes, en términos de DQO, presentes en el lixiviado maduro del relleno El Henequén utilizando el tratamiento de oxidación avanzada –fotofenton.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 MARCO CONTEXTUAL

Según reporta la investigación de SALAZAR Y SAAVEDRA, 2009, el relleno Sanitario “El Henequén” está dispuesto en un terreno de 61,11 Ha, localizado en la vereda Las Nubes a 1609 m a partir de la intersección de la Autopista al Mar (Carrera 46) y la Avenida Circunvalar al suroeste, la temperatura promedio es de 31°C, y en él se disponían aproximadamente 1.600 To n/día de residuos sólidos. Fue construido en el año de 1990 y prestaba sus servicios a la antigua Empresas Públicas Municipales y al momento de entrar en operación el servicio de aseo, por parte de la empresa Triple A en 1992, era el sitio de disposición final de las basuras de Barranquilla y su Área Metropolitana (Puerto Colombia, Galapa y Soledad.)

El relleno fue clausurado el 31 de Marzo de 2009 brindando una vida útil de 19 años, esto se debió a que no cumplía con el plan de manejo ambiental para mitigar los malos olores, en especial por no contar con un adecuado manejo de los lixiviados, tema en el cual se concentra la mayor causa de contaminación actual y se radicó como la razón de mayor peso que provocó su cierre tras las continuas quejas de la comunidad por la contaminación ocasionada. (SALAZAR Y SAAVEDRA 2009).

El relleno cuenta con un cerco perimetral de 1600 m de estaca y alambre reforzado con especies vivas. Éste se encuentra ubicado paralelamente al camino de la vereda Las Nubes y a un predio vecino. Las secciones que no cuentan con un cerco colindan con terrenos sin acceso público y un bosque natural.

Figura 1: Vista satelital del relleno Sanitario el Henequén.



Fuente: Adaptado de SALAZAR Y SAAVEDRA, 2009.

MARCO TEÓRICO

4.1.1 Rellenos sanitarios

Según Prato, el relleno sanitario es entendido hoy en día como aquella instalación destinada a la disposición final de residuos sólidos no reciclables ni aprovechables, diseñada para minimizar los impactos ambientales y reducir los riesgos sanitarios potencialmente generables por dichos residuos, amén de controlar las reacciones y procesos propios de su descomposición dentro del mismo relleno, mediante procedimientos previstos y concebidos (PRATO 2007).

La selección del método a utilizar para la operación del relleno sanitario debe realizarse con base en las condiciones topográficas, geotécnicas e hidrogeológicas del sitio seleccionado para la disposición final de los residuos. Debe establecerse el perfil estratigráfico del suelo y el nivel de acuíferos freáticos permanentes y transitorios. Los métodos más recomendables son (PRATO 2007).

- Método de zanja o trinchera.
- Método de área.
- Método de rampa.
- Método combinado.

4.1.2 Características básicas de un relleno sanitario

Todo relleno sanitario debe tener un sistema de impermeabilización en el fondo y debe contar con un sistema de recolección y evacuación de aguas de escorrentía y lixiviados. Para el dimensionamiento de las celdas, el ancho debe estar definido por el número de vehículos que llegan simultáneamente o con intervalos de 5 minutos y el largo debe estar definido por la cantidad de residuos sólidos que llega al relleno en un día. Para los niveles medio y bajo de complejidad la altura se debe limitar a 1.5 m. incluido el material de cobertura, si este es manual. Para los niveles alto y medio alto de complejidad la altura máxima de la celda diaria debe ser de 3 m incluidos el espesor de los residuos a disponer y el material de cubierta requerido, pero de todas maneras la altura depende de la estabilidad del sitio. La estabilidad de los taludes que conforman el relleno sanitario debe ser verificada

teniendo en cuenta la caracterización de los residuos y el esfuerzo cortante a lo largo de las interfaces para lo cual debe ensayarse el material y evaluar el ángulo de fricción en la interfase. (PRATO 2007).

4.1.3 Reacciones de degradación

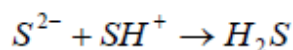
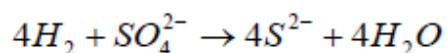
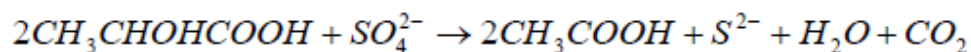
La mayor parte de los residuos sólidos generados en las viviendas (el 50% cuando menos) son de tipo orgánico, los cuales se degradan gradualmente a través de cinco fases dentro de un relleno sanitario. (PRATO 2007).

4.1.3.1 Hidrólisis aerobia

En esta fase los componentes orgánicos biodegradables de los residuos sólidos urbanos sufren descomposición microbiana durante la disposición en un relleno sanitario, y poco después, se inicia la descomposición biológica bajo condiciones aerobias, ya que hay cierta cantidad de aire atrapado dentro del relleno sanitario. Durante esta etapa los microorganismos convierten algunos hidratos de carbono en azúcares simples (como la glucosa), dióxido del carbono y agua. (PRATO 2007)

4.1.3.2 Hidrólisis y fermentación

A medida que desciende el oxígeno comienzan a desarrollarse condiciones anaerobias y el relleno sanitario se convierte en anaerobio; el nitrato y el sulfato, que pueden servir como receptores de electrones en reacciones de conversión biológica, a menudo se reducen a nitrógeno y sulfuro de hidrógeno, como se ilustra en las ecuaciones siguientes: (PRATO 2007).



El proceso implica la transformación mediada por enzimas (hidrólisis), de compuestos con alto peso molecular (por ejemplo lípidos, polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos en compuestos aptos para ser utilizados por los microorganismos como fuentes de energía y de carbono celular. (PRATO 2007).

4.1.3.3 Acetogénesis

Representa la conversión microbiana de los compuestos resultantes de la fase anterior en compuestos intermedios de bajo peso molecular, como son el ácido acético (CH_3COOH) y pequeñas concentraciones de ácido fúlvico y otros ácidos más complejos. El dióxido de carbono es el principal gas generado durante esta fase. También se producen cantidades pequeñas de hidrógeno (H_2). La demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) y la demanda química de oxígeno (DQO) se incrementan significativamente en esta fase, debido a la disolución de ácidos orgánicos en el lixiviado, con unos valores de biodegradabilidad entre 0.4 y 0.7, indicando que se trata de un efluente biodegradable. (MMMA 2002 y GREENPEACE 2005, Citado por PRATO 2007).

4.1.3.4 Metanogénesis

En esta fase, las bacterias convierten el ácido acético en metano y CO_2 . El hecho anterior causa que el pH dentro del relleno sanitario suba a valores más neutros, es decir, en el rango de 6.8 a 8. A continuación, el pH del lixiviado, subirá, y se reducirán las concentraciones de DBO_5 , DQO y el valor de conductividad del lixiviado. (MMMA 2002 y GREENPEACE 2005, Citado por PRATO 2007).

4.1.4 Maduración y Estabilización

Esta fase se produce después de convertirse el material orgánico biodegradable en CH_4 y CO_2 . Durante esta fase, la velocidad de generación de metano en el relleno sanitario disminuye significativamente, porque la mayoría de los nutrientes se han separado con el lixiviado durante las fases anteriores, y los sustratos que quedan en el relleno sanitario son de degradación lenta. Los principales gases de relleno sanitario durante esta fase siguen siendo CH_4 y CO_2 . Según las medidas de sellado del relleno sanitario, también pueden encontrarse pequeñas cantidades de nitrógeno y oxígeno en el gas del relleno sanitario. Durante la fase de maduración, el lixiviado contendrá ácidos Húmicos y Fúlvicos (moléculas complejas de alto peso molecular), que son difíciles de degradar biológicamente. Finalmente, las condiciones pueden tornarse nuevamente aerobias (debido principalmente a fracturas dentro de las cárcavas) y es allí cuando el relleno se encuentra estabilizado.

4.1.4.1 Reacciones químicas

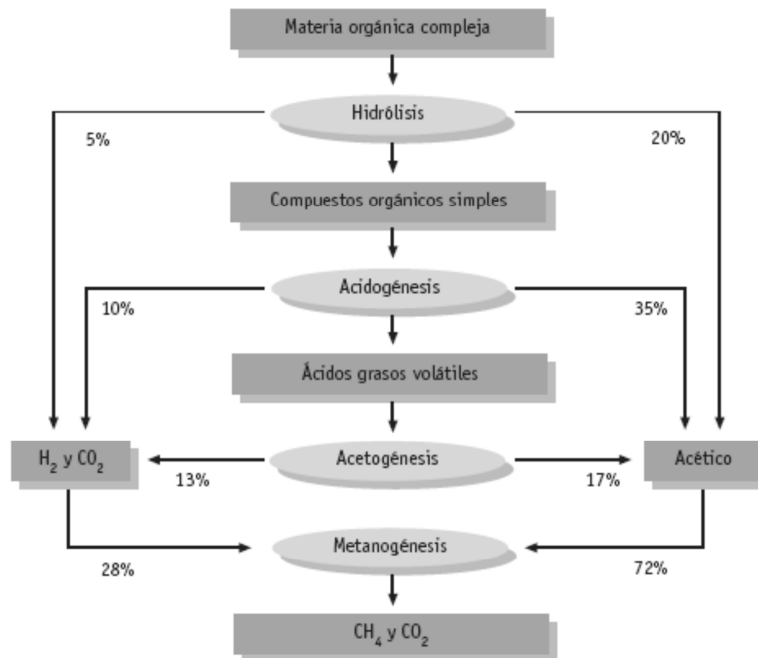
Dos tipos generales de reacciones químicas tienen lugar dentro de la masa de residuos sólidos en descomposición en un relleno sanitario. La primera de ellas, involucra reacciones de oxidación a causa del oxígeno atrapado en los residuos dispuestos. El segundo tipo de reacción es de ácido-metal, debido a la presencia de ácidos orgánicos y CO_2 . Estos procesos movilizan los iones metálicos y sales que son los contaminantes potenciales. Sin embargo, una vez que la generación del metano se establece en el relleno (metanogénesis) se genera menos ácido y generalmente se retienen metales. (MMMA, 2002 y GREENPEACE 2005, Citado por PRATO 2007).

4.1.4.2 Reacciones Físicas

Los efectos del agua cuando entra en contacto con los residuos dispuestos, hacen que se favorezca la disolución de materiales solubles, los cuales quedan disponibles para procesos de absorción y adsorción. (MMMA 2002 y GREENPEACE 2005, Citado por PRATO 2007).

Para finalizar, debemos entender que la metanogénesis es la etapa crítica en el proceso de degradación, por las características de las bacterias que la llevan a cabo, y por ser la más lenta de todo el proceso. Actualmente está ampliamente aceptado que la degradación de la materia orgánica sigue la serie de etapas discutida con anterioridad, la cual se puede resumir en el siguiente diagrama de flujo. (MMMA 2002 y GREENPEACE 2005, Citado por PRATO 2007).

Figura 2. Esquema simplificado del proceso de degradación anaerobia.



Fuente: RODRÍGUEZ et al. 2006 Citado por PRATO 2007

Tanto las variables físicas como las químicas influyen en el hábitat de los microorganismos. En los procesos anaerobios es importante tener en cuenta la influencia de factores medioambientales. Las bacterias formadoras de metano son las más sensibles a estos factores, por lo que un funcionamiento inadecuado de las mismas puede causar una acumulación de productos intermedios (ácidos) y desestabilizar por completo el sistema. (MMMA 2002 y GREENPEACE 2005 Citado por PRATO 2007).

4.1.5 Composición del Lixiviado de un Relleno Sanitario

Según Prato, se entiende por lixiviado el líquido residual que es generado en la descomposición bioquímica de los residuos o como resultado de la percolación de agua a través de los residuos en proceso de degradación, este líquido tiende a salir, por gravedad, por la parte inferior del Relleno Sanitario, hasta que una capa impermeable lo impida. (PRATO 2007).

El agua que se introduce en el seno de la masa de residuos, debido principalmente a fuentes externas (agua lluvia, drenaje superficial, aguas subterráneas, entre otras), se filtra a través de los residuos sólidos en descomposición lo que produce la lixiviación de materiales biológicos y compuestos químicos, tanto orgánicos como inorgánicos. Este proceso da lugar a la aparición de unas corrientes líquidas caracterizadas principalmente por un gran número de sustancias, con valores a menudo extremos de pH, alta carga orgánica y metales pesados, así como por su intenso mal olor (MMMA 2002 y LOPES DE MORAIS 2005, Citado por PRATO 2007).

En condiciones normales, el lixiviado se encuentra en el fondo de los rellenos sanitarios. Desde allí el movimiento es a través de los estratos subyacentes, aunque también ocurre algún movimiento lateral, dependiendo de las características del material circundante y de la forma del suelo que soporta el lleno (topografía, pendiente, tipo de suelo, forma de la cuenca, etc.). De acuerdo con los conocimientos actuales, las cantidades de lixiviados pueden determinarse según el grado de compactación del relleno: (MMMA 2002 y LOPES DE MORAIS 2005, Citado por PRATO 2007).

- Rellenos compactados con compactadores: 25% de la tasa de precipitación anual (aproximadamente $5 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{d}$ para el caso de 750 mm de precipitación anual)
- Rellenos compactados con orugas: 40% de la tasa de precipitación anual (aproximadamente $9 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{d}$ para el caso de 750 mm de precipitación anual).

Las cantidades de lixiviados para rellenos se ubican aproximadamente entre estos valores. En la práctica pueden darse desviaciones de estos valores, condicionadas por particularidades locales. Al calcular las cantidades de lixiviados hay que tener en cuenta que, por lo general, su producción no está distribuida en forma equitativa a lo largo del año (citado por Prato). En la siguiente tabla, se muestran los principales factores que afectan la composición del lixiviado de un relleno sanitario (MMMA 2002 y LOPES DE MORAIS 2005, Citado por PRATO 2007).

Tabla 1. Factores que influyen en las características del lixiviado de relleno sanitario.

| | |
|---|---|
| Características De Los Residuos Sólidos | Composición, granulometría, humedad, edad del residuo, pretratamiento. |
| Condiciones Ambientales | Régimen pluviométrico, temperatura, clima, características geológicas del terreno. |
| Características del Relleno | Aspectos constructivos de las celdas, balance hídrico, grado de compactación, propiedades del terreno, codisposición de residuos líquidos, irrigación, recirculación. |
| Procesos Internos | Hidrólisis, adsorción, biodegradación, especiación, disolución, reducción, fuerza iónica, tiempo de contacto, generación y transporte de gases. |

Fuente: MMA et al.2002 Citado por PRATO 2007

La variabilidad de la composición de los residuos dispuestos suele producir un percolado con contenidos elevados de metales pesados (según la edad del lixiviado), compuestos xenobióticos y microorganismos con efectos negativos sobre la salud humana. (MMA et al.2002, Citado por PRATO 2007)

CHIRSTENSEN et al. 2001, a partir de una revisión bibliográfica proponen la clasificación de los contaminantes presentes en un lixiviado de relleno sanitario en cuatro grandes categorías (Citado por PRATO 2007).

1. Materia Orgánica Disuelta (MOD), expresada como DQO (Demanda Química de Oxígeno), o COT (Carbono Orgánico Total) e incluyendo metano, ácidos grasos volátiles (AGV) y compuestos biorecalcitrantes (compuestos húmicos y Fúlvicos).
2. Macrocomponentes Inorgánicos: calcio, magnesio, sodio, potasio, amonio, hierro, manganeso, cloruros, sulfatos, sulfuros, carbonatos y metales potencialmente tóxicos como: cadmio, cromo, plomo, níquel, cobre, zinc.
3. Compuestos Orgánicos Xenobióticos: Los cuales pueden incluir una gran variedad de compuestos halogenados, compuestos fenólicos, alcoholes,

aldehídos, cetonas, ácidos carboxílicos, además de otras sustancias de características tóxicas.

4. **Compuestos Trazas:** Son sustancias encontradas en menores concentraciones como: boro, arsénico, selenio, bario, litio, mercurio y cobalto.

Varios compuestos orgánicos como: ftalatos, hidrocarburos aromáticos policíclicos, fenoles y compuestos aromáticos nitrogenados o clorados, también han sido detectados. Muchos de ellos tienen como fuente productos de uso diario, sin embargo, de acuerdo con es difícil asegurar que un compuesto encontrado en un lixiviado es proveniente de sustancias originalmente presentes en el relleno o es originado mediante procesos de degradación. (OMAN et al.1993, Citado por PRATO, 2007)

La toxicidad del lixiviado no puede ser atribuida únicamente a la presencia de grandes cantidades de compuestos recalcitrantes, metales pesados, elevada alcalinidad y la presencia del ion amonio. Se debe tener en cuenta el efecto sinérgico entre las diferentes sustancias presentes. (PACHECO et al.2004 Citado por PRATO 2007)

Debido a la complejidad del lixiviado, su caracterización (composición global) se lleva a cabo a partir de análisis fisicoquímicos y de pruebas biológicas, entre las que se destacan. (MMMA et al. 2002, Citado por PRATO 2007)

- **PH.** (potencial de hidrógeno). Es una medida utilizada para evaluar la alcalinidad o acidez de una solución dependiendo de la concentración de H^+ .
- **DQO:** La demanda química de oxígeno (DQO) de un agua puede considerarse como la cantidad de oxígeno consumida en la oxidación química total de los constituyentes orgánicos para transformarse en productos finales inorgánicos. El valor de DQO depende, por lo tanto, de la composición del agua estudiada. La concentración de DQO es utilizada como un parámetro global para indicar el contenido en materia orgánica de un agua.
- **COT:** Carbono Orgánico Total (COT; a veces TOC, siglas en ingles, el carbón es un elemento que normalmente está presente en la naturaleza y es especial del agua cuando esta posee

sustancias orgánicas en su superficie. A nivel de laboratorio se puede calcular midiendo la cantidad de dióxido de carbono que es liberado después de utilizar tratamientos con oxidantes químicos. Este parámetro es usado para medir la calidad del agua.

- **DBO₅**. La demanda bioquímica de oxígeno (DBO), Es una medida de la cantidad de oxígeno requerido para que los microorganismos presentes en la muestra de agua degraden la materia orgánica que en ella se encuentra. Este parámetro es utilizado para medir el grado de contaminación, normalmente se mide después de pasar 5 días de reacción (DBO₅), y se expresa en miligramos por litro (mg/l).
- **Alcalinidad**: Es causada por la presencia de iones carbonatos CO₃ y bicarbonatos la capacidad. Se puede entender como la capacidad que tiene una muestra para neutralizar ácidos o aceptar protones.

Además de los parámetros anteriores existen una serie de relaciones entre ellos, de gran importancia que permiten clasificar el lixiviado generado: (MMA et al. 2002 Citado por PRATO 2007)

- Razón de biodegradabilidad (DBO₅/DQO).
- Razón (Sulfatos/Cloruros).

La razón de biodegradabilidad, puede ser directamente relacionada con la fracción de materia orgánica biodegradable presente y es función de la fase de degradación en que se encuentra el relleno. La relación (sulfatos/cloruros) refleja el grado de anaerobiosis del lixiviado, ya que, a medida que transcurre el tiempo las bacterias metanogénicas transforman el sulfato y sulfuro presente en el medio. (PRATO 2007)

Según Braig et al, (1999) el lixiviado puede ser joven (reciente), intermediario y maduro (viejo). La clasificación se lleva a cabo a partir de las características presentadas con anterioridad y se explica a continuación (PRATO 2007).

Debido a que los microorganismos son los encargados de la degradación (tratamiento) de los efluentes más comunes, su incapacidad para degradar o transformar ciertas sustancias es un indicio de su persistencia en el medio ambiente o de su biorecalcitrancia. Esta incapacidad puede estar asociada a: (PRATO 2007)

1. Estructura química compleja.
2. Acción tóxica de los compuestos presentes.
3. Interacción (sinergias) entre compuestos presentes.
4. Generación de compuestos tóxicos debido al metabolismo celular.

La biorecalcitrancia, puede estar relacionada con la presencia de compuestos de elevada masa molecular y de estructuras muy complejas (por ejemplo, sustancias húmicas), que son sustancias parcialmente aromáticas que no exhiben las características fisicoquímicas normalmente asociadas a compuestos de estructura orgánica bien definida (LOPES DE MORAIS 2005, Citado por PRATO 2007). La clasificación de las sustancias húmicas es meramente operacional y está basada en las propiedades de solubilidad a diferentes valores de pH. El termino ácidos húmicos (AH), ácidos Fúlvicos (AF), y huminas (HU) hace referencia a las principales fracciones usadas hasta el día de hoy para describir los compuestos húmicos. La fracción de AH es aquella soluble a valores de pH alcalino, la fracción AF es aquella que después de la solubilización por álcalis, se mantiene soluble a cualquier valor de pH y la fracción HU es insoluble en todo el rango de pH (LOPES DE MORAIS 2005). La gran variabilidad en la composición de los lixiviados se refleja en la siguiente tabla tomada de Chirstensen y colaboradores, 2001. (PRATO, 2007)

Tabla 2. Composición media de un lixiviado de relleno sanitario.

| PARÁMETRO | UNIDAD | RANGO |
|-------------------------------|---------|--------------|
| pH | - | 4.5-9.0 |
| Conductividad | [μS/cm] | 2500-35000 |
| Sólidos Totales (ST) | [mg/l] | 2000-60000 |
| Carbono Orgánico Total (COT) | [mg/l] | 30-29000 |
| DBO ₅ | [mg/l] | 20-57000 |
| DQO | [mg/l] | 140-152000 |
| Nitrógeno Orgánico | [mg/l] | 14-2500 |
| P total | [mg/l] | 0.1-23 |
| Cloruros | [mg/l] | 150-4500 |
| Sulfatos | [mg/l] | 8-7750 |
| HCO ₃ ⁻ | [mg/l] | 610-7320 |
| K | [mg/l] | 50-3700 |
| Nitrógeno Amoniacal | [mg/l] | 50-2200 |
| Calcio | [mg/l] | 10-7200 |
| Magnesio | [mg/l] | 30-15000 |
| Hierro | [mg/l] | 3-5500 |
| Manganeso | [mg/l] | 0.03-1400 |
| Arsénico | [μg/l] | 0.01-1 |
| Cadmio | [μg/l] | 0.0001-0.4 |
| Cromo | [μg/l] | 0.02-1.5 |
| Cobalto | [μg/l] | 0.005-1.5 |
| Cobre | [μg/l] | 0.005-10 |
| Plomo | [μg/l] | 0.001-5 |
| Mercurio | [μg/l] | 0.00005-0.16 |
| Níquel | [μg/l] | 0.015-13 |
| Zinc | [μg/l] | 0.03-1000 |

Fuente: CHIRSTENSEN et al 2001, Citado por PRATO 2007

Adicionalmente, según la edad del relleno se presentan los siguientes valores de composición para el lixiviado. (KJELDSSEN et. al. 2001 Citado por PRATO 2007)

Tabla 3. Composición media de un lixiviado de relleno sanitario según la fase operativa.

| PARÁMETRO | UNIDAD | FASE ANAEROBIA | | FASE METANOGENICA | |
|-------------------|--------|----------------|----------|-------------------|----------|
| | | Rango | V. Medio | Rango | V. Medio |
| pH | - | 4.5-7.5 | 6.1 | 7.5-9 | 8.0 |
| DBO ₅ | [mg/l] | 4-40000 | 13000 | 20-550 | 180 |
| DQO | [mg/l] | 60-60000 | 22000 | 500-4500 | 3000 |
| Biodegradabilidad | - | - | 0.58 | - | 0.06 |
| Sulfato | [mg/l] | 70-1750 | 500 | 10-420 | 80 |
| Calcio | [mg/l] | 10-2500 | 1200 | 20-600 | 60 |
| Magnesio | [mg/l] | 50-1150 | 470 | 40-350 | 180 |
| Hierro | [mg/l] | 20-2100 | 780 | 3-250 | 15 |
| Manganeso | [mg/l] | 0.3-65 | 25 | 0.03-15 | 0.7 |
| Zinc | [mg/l] | 0.1-120 | 5.0 | 0.03-4 | 0.6 |

Fuente: KJELDTSEN et al. 2002, Citado por PRATO 2007

Las características físico-químicas de un lixiviado dependen altamente de una serie de factores tales como la naturaleza y la cantidad de los residuos almacenados, la antigüedad y forma de explotación del vertedero, la climatología del lugar o la época del año considerada. Su composición es bastante compleja y variable, pudiendo ser sus componentes clasificados en cuatro grandes categorías: materia orgánica disuelta (expresada en forma de parámetros generales como DQO o COT), componentes inorgánicos (Cl^- , SO_4^{2-} , N-NH_3 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), metales pesados (Fe, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn) y compuestos xenobióticos (PAHs, AOX o fenoles) (CHRISTENSEN et al. 2001 y KJELDTSEN et al. 2002. EL FADEL et al. 2002). La Tabla 4 muestra la composición típica de los diferentes tipos de lixiviado en función de la edad del vertedero. (KJELDTSEN et al. 2001 Citado por PRATO 2007)

Tabla 4. Caracterización de los diferentes tipos de lixiviados.

| Parámetro | Tipo de lixiviado | | |
|---------------------------|-------------------|------------|---------|
| | Joven | Intermedio | Estable |
| Edad del vertedero (años) | < 1 | 1 – 5 | > 5 |
| pH | < 6,5 | 6,5 – 7,5 | > 7,5 |
| DBO ₅ /DQO | 0,6 – 1 | 0,3 – 0,6 | 0 – 0,3 |
| DQO (g/L) | > 15 | 5 – 15 | < 5 |
| N-NH ₃ (mg/L) | < 400 | <i>nd</i> | > 400 |
| Metales pesados (mg/L) | > 2 | < 2 | < 2 |

Fuente: ALVAREZ-VAZQUEZ et al. 2004, Citado por PRIMO 2008.

El conocimiento de estas características propias de cada lixiviado nos va guiando hacia la elección del tratamiento más apropiado y eficaz para disminuir su carga contaminante hacia el medio ambiente.

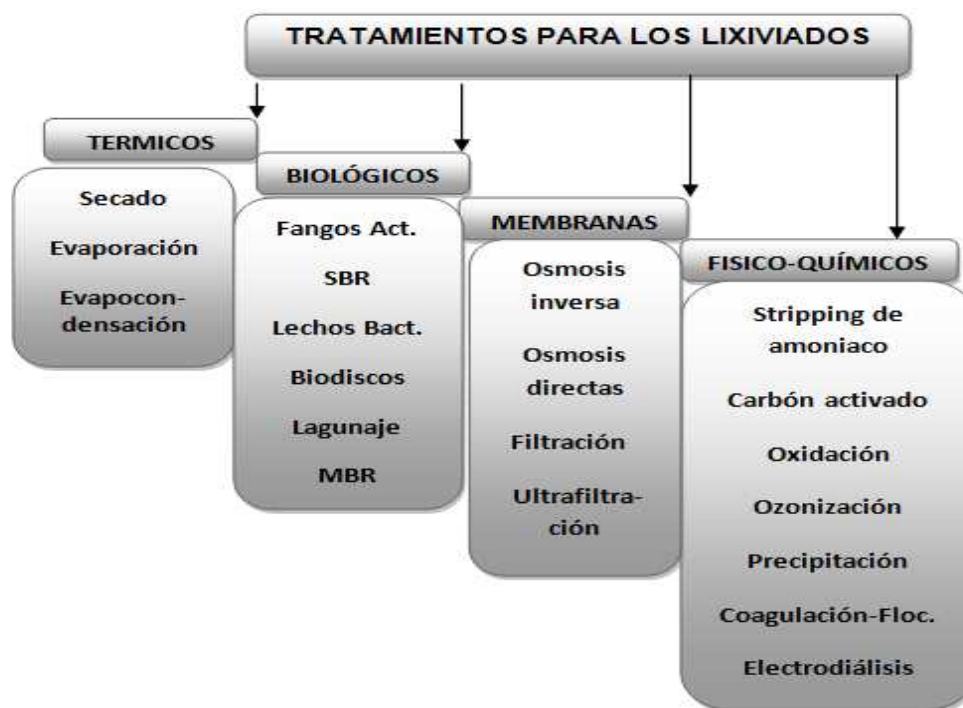
4.1.6 Procesos convencionales para el tratamiento de lixiviados

La selección del proceso más adecuado para el tratamiento del lixiviado varía en función de las características del propio lixiviado, de su composición química. Así, los parámetros de concentración de amonio, materia orgánica biodegradable y no biodegradable, conductividad y cloruros son factores importantes que determinan cuál es la tecnología más adecuada para aplicar en el tratamiento de estos lixiviados. (PRATO 2007)

Pero también han de considerarse las características del medio receptor de los efluentes tratados, así como los límites legales de vertido. Muchos tratamientos generan a su vez otras fracciones residuales y concentradas que deben a ser gestionados. Pero además de los factores técnicos y legales hay que valorar los aspectos económicos, inversión y costes de explotación. (PRATO 2007)

Los técnicos de los depósitos controlados deben seleccionar e implantar las mejores tecnologías disponibles adaptándolas a cada tipo de instalación. En el momento que se requiere la instalación de una planta de tratamiento de lixiviado se debe realizar un estudio de viabilidad tecnológica y seleccionar la mejor tecnología disponible. Dada la complejidad química de los lixiviados, normalmente su tratamiento adecuado implica una combinación de distintas tecnologías, como las que se muestran en la tabla.

Tabla 5. Tratamientos para los lixiviados.



Fuente: Autor

A la hora de revisar los tratamientos unitarios más convencionales no resulta fácil establecer una clasificación universal. Una de las formas más utilizadas es en función de los contaminantes presentes, o también en función del tratamiento ejercido (químico, físico o biológico). (PRATO 2007)

4.1.6.1 Tratamiento de materia en suspensión

La materia en suspensión puede ser de muy diversa índole, desde partículas de varios centímetros y muy densas (normalmente inorgánicas), hasta suspensiones coloidales muy estables y con tamaños de partícula de hasta unos pocos nanómetros (normalmente de naturaleza orgánica). También la concentración de los mismos, tanto en el agua a tratar como en el agua una vez tratada, juega un papel fundamental a la hora de la elección del tratamiento más conveniente. (PRATO 2007)

Las operaciones para eliminar este tipo de contaminación de aguas suelen ser las primeras en efectuarse, dado que la presencia de partículas en suspensión puede ser indeseable en muchos otros procesos de tratamiento. La eliminación de materia en suspensión se suele hacer mediante operaciones mecánicas. Sin embargo, en muchos casos, y para favorecer esa separación, se utilizan aditivos químicos, denominándose en este caso tratamientos químico-físicos. Las principales operaciones se resumen a continuación. Debe observarse que cada una se puede aplicar dependiendo de las características de las partículas presentes. (PRATO 2007)

- Desbaste.
- Sedimentación.
- Filtración.
- Flotación.
- Coagulación y Floculación.

4.1.6.2 Tratamiento de materia disuelta

Al igual que en el caso de la materia en suspensión, la materia disuelta puede tener características y concentraciones muy diversas: desde grandes cantidades de sales inorgánicas disueltas (salmueras), orgánicas (materia orgánica biodegradable en industria de alimentación) hasta cantidades extremadamente pequeñas de inorgánicos (metales pesados) y orgánicos (pesticidas) pero de eliminación obligatoria, dado su carácter peligroso. Algunos de estos tratamientos están siendo desplazados por otros más avanzados y emergentes, como son los procesos de oxidación avanzada y las operaciones con membrana, especialmente en el caso de las aguas industriales. Los procesos más representativos se mencionan a continuación: (PRATO 2007)

- Precipitación.
- Separación con membranas selectivas.

- Intercambio iónico.
- Adsorción.
- Procesos electroquímicos. Oxidación-reducción.

Electrocoagulación.

Peroxicoagulación.

Electrofenton.

- Procesos Fotoquímicos

Homogéneos.

Heterogéneos.

4.1.6.3 Procesos de tratamiento biológicos.

Los procesos biológicos constituyen una serie de importantes procesos de tratamiento que tienen en común la utilización de microorganismos para llevar a cabo la eliminación de componentes indeseables del agua, aprovechando la actividad metabólica de los mismos sobre esos componentes. La aplicación tradicional consiste en la eliminación de materia orgánica biodegradable, tanto soluble como coloidal, así como la eliminación de compuestos que contienen elementos nutrientes (N y P). Es uno de los tratamientos más habituales, no sólo en el caso de aguas residuales urbanas, sino en buena parte de las aguas industriales con contenidos de materia orgánica biodegradable. (RODRIGUEZ et al. 2006 Citado por PRATO 2007)

En la mayor parte de los casos, la materia orgánica constituye la fuente de energía y de carbono que necesitan los microorganismos para su crecimiento. Además, también es necesaria la presencia de nutrientes, que contengan los elementos esenciales para el crecimiento, especialmente los compuestos que contengan N y P, y por último, en el caso de sistema aerobio, la presencia de oxígeno disuelto en

el agua. El contenido de materia orgánica y el tipo de contaminante presente, serán claves a la hora de elegir el proceso biológico más conveniente. En el metabolismo bacteriano juega un papel fundamental el elemento aceptor de electrones en los procesos de oxidación de la materia orgánica. Este aspecto, además, tiene una importante incidencia en las posibilidades de aplicación al tratamiento de aguas. Atendiendo a cual es dicho aceptor de electrones distinguimos tres casos. (PRATO 2007)

- **Sistemas aerobios:** La presencia de O_2 hace que este elemento sea el aceptor de electrones, por lo que se obtienen rendimientos energéticos elevados, provocando una importante generación de lodos, debido al alto crecimiento de las bacterias aerobias. Su aplicación en aguas residuales puede estar muy condicionada por la baja solubilidad del oxígeno en el agua. (PRATO 2007)
- **Sistemas anaerobios:** En este caso, el aceptor de electrones puede ser el CO_2 o parte de la propia materia orgánica, obteniéndose como producto de esta reducción el carbono en su estado más reducido, CH_4 . La utilización de este sistema, tendría, como ya se explicará, como ventaja importante, la obtención de un gas combustible. Los procesos anaerobios resultan útiles cuando se presentan cargas elevadas de materia orgánica. (PRATO 2007)
- **Sistemas anóxicos:** Se denominan así los sistemas en los que la ausencia de O_2 y la presencia de NO_3^{3-} hacen que este último elemento sea el aceptor de electrones, transformándose, entre otros, en N_2 , elemento completamente inerte. Por tanto es posible, en ciertas condiciones, conseguir una eliminación biológica de nitratos (desnitrificación). (PRATO 2007)

4.1.6.4 Procesos biológicos aerobios. Lodos activados.

Consiste en poner en contacto en un medio aerobio, normalmente en estanque aireado, el agua residual con flóculos biológicos previamente formados, en los que se adsorbe la materia orgánica y donde es degradada por las bacterias presentes. Junto con el proceso de degradación, y para separar los flóculos del agua, se ha de llevar a cabo una sedimentación desde donde se realizará una recirculación de parte de los lodos, para mantener una elevada concentración de microorganismos en el interior de reactor, además de una purga equivalente a la cantidad

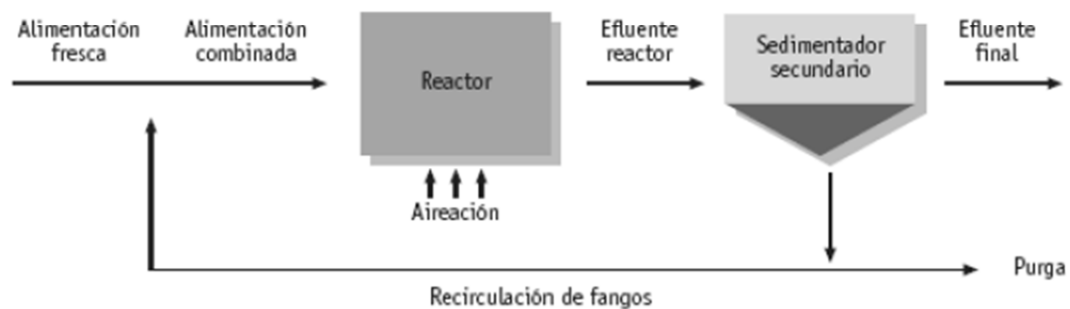
microorganismos sintetizada en el proceso. (RODRIGUEZ et al. 2006 Citado por PRATO 2007)

Dentro de los parámetros básicos de funcionamiento, un muy importante es el de la aireación. La solubilidad del oxígeno en el agua es pequeña (en torno a 8-9 mg O_2 /L, dependiendo de presión y temperatura) por lo que será necesario asegurar el suministro a los microorganismos utilizando aireadores superficiales capaces de suministrar 1 kg O_2 /kW·h, o bien difusores. El valor mínimo de operación aconsejable de concentración de oxígeno disuelto es de 2 mg/L. El consumo eléctrico en esta operación será importante dentro de los costes de operación del proceso. (RODRIGUEZ et al. 2006, Citado por PRATO 2007)

Otro parámetro clave en el proceso se refiere al parámetro A/M, algunas veces denominada I, intensidad de carga. Se refiere a la relación entre la carga orgánica alimentada y la cantidad de microorganismos disponibles en el sistema, con unidades [kgDBO₅ (o DQO) / kgSSV·día]. Es un parámetro de diseño fundamental, teniendo un valor óptimo entre 0.3-0.6 para las condiciones más convencionales de funcionamiento. Además tiene una influencia determinante en la buena sedimentación posterior. La denominada “edad celular” también es un parámetro importante. Se refiere al tiempo medio que permanecen los lodos biológicos en el interior del sistema. Este parámetro suele tener un valor de 5-8 días en condiciones convencionales de operación. (PRATO 2007)

El esquema simplificado del proceso se muestra a continuación:

Figura 3: Proceso general de lodos activados



Fuente: PRATO 2007

4.1.6.5 Procesos biológicos anaerobios

El tratamiento anaerobio es un proceso biológico ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales, cuando estas presentan una elevada carga orgánica. El proceso anaerobio, se presenta como una buena alternativa frente al que sería un costoso tratamiento aerobio, debido al suministro elevado de oxígeno para mantener en condiciones aerobias el reactor o debido a las dificultades asociadas a la velocidad de consumo de oxígeno y a las limitaciones difusionales. El tratamiento anaerobio se caracteriza por la producción del denominado "biogás", formado fundamentalmente por metano (60 - 80%) y dióxido de carbono (40-20%) y susceptible de ser utilizado como combustible para la generación de energía térmica y/o eléctrica. (PRATO 2007).

Además, solo una pequeña parte de la DQO tratada (5-10%) se utiliza para formar nuevas bacterias, frente al 50-70% de un proceso aerobio. Sin embargo, la lentitud del proceso anaerobio obliga a trabajar con altos tiempos de residencia, por lo que es necesario diseñar reactores o digestores con una alta concentración de microorganismos. Realmente, es un complejo proceso en el que intervienen varios grupos de bacterias, tanto anaerobias estrictas como facultativas, en el que, a través de una serie de etapas y en ausencia de oxígeno, se conduce fundamentalmente a la formación de metano y dióxido de carbono. Cada etapa del

proceso, es realizada por grupos distintos de bacterias, que han de operar en perfecto equilibrio. (RODRIGUEZ et al. 2006, Citado por PRATO 2007)

1. Hidrólisis: La hidrólisis es la ruptura de moléculas grandes, solubles e insolubles, en moléculas de menor tamaño que pueden ser transportadas dentro de las células y metabolizadas. En este proceso no se produce metano, y en la mayor parte de los casos supone una etapa que se desarrolla lentamente (PRATO 2007).

2. Formación de ácidos (acidogénesis) y acetato (acetogénesis): Los productos finales de la hidrólisis son transformados en ácidos orgánicos de cadena corta, otros compuestos de bajo peso molecular, hidrógeno y dióxido de carbono. Estas bacterias son altamente resistentes a variaciones en las condiciones ambientales. Por ejemplo, aunque el pH óptimo para el desarrollo de su actividad metabólica es 5-6, los procesos anaerobios generalmente son conducidos a pH 7, y aún en estas condiciones su actividad metabólica no decae (PRATO 2007).

3. Metanogénesis: La formación de metano, siendo este el último producto de la digestión anaerobia, ocurre por dos grandes rutas: La primera de ellas, es la formación de metano y dióxido de carbono a partir del principal producto de la fermentación, el ácido acético. Las bacterias que consumen el ácido acético se denominan bacterias acetoclastas. Algunas bacterias metanogénicas son también capaces de usar el hidrógeno para reducir el dióxido de carbono a metano (metanogénicas hidrogenoclastas). La metanogénesis es la etapa crítica en el proceso de degradación, por las características de las bacterias que la llevan a cabo, y por ser la más lenta de todo el proceso. En buena medida, la digestión anaerobia se ha de llevar a cabo en las condiciones óptimas para el buen funcionamiento de estas bacterias metanogénicas (PRATO 2007).

Entre las ventajas más significativas del tratamiento anaerobio frente al aerobio cabe destacar la alta eficacia de los sistemas, incluso en aguas residuales de alta carga, el bajo consumo de energía, pequeña producción de lodos y por tanto, requerimiento mínimo de nutrientes, así como su eficacia ante alteraciones importantes de carga y posibilidad de grandes periodos de inactividad sin alteración importante en la población bacteriana. Sin embargo, como desventajas caben destacar: la baja efectividad en la eliminación de nutrientes y patógenos, generación de malos olores y la necesidad de un postratamiento generalmente aerobio para alcanzar los niveles de depuración demandados, así como los generalmente largos periodos de estabilización del proceso (arranque). Igualmente, los sistemas anaerobios presentan problemas operativos cuando se

presentan cargas significativas de compuestos biorecalcitrantes. (RODRIGUEZ et al. 2006, Citado por PRATO 2007).

4.1.6.6 Tecnología de membranas.

Las membranas son barreras físicas semipermeables que separan dos fases, impidiendo su íntimo contacto y restringiendo el movimiento de las moléculas de forma selectiva. Este hecho permite la separación de las sustancias contaminantes del agua, generando un efluente acuoso depurado. La rápida expansión, a partir de 1960, de la utilización de membranas en procesos de separación a escala industrial ha sido propiciada por dos hechos: la fabricación de membranas con capacidad para proporcionar elevados flujos de permeado y la fabricación de dispositivos compactos, baratos y fácilmente intercambiables donde disponer grandes superficies de membrana. Se presenta a continuación de manera no extensa una serie de ventajas-desventajas de los procesos por membranas. (RODRIGUEZ et al. 2006, Citado por PRATO 2007).

1. Permiten la separación de contaminantes que se encuentran disueltos o dispersos en forma coloidal.
2. Eliminan contaminantes que se encuentran en baja concentración.
3. Las operaciones se llevan a cabo a temperatura ambiente.
4. Procesos sencillos y diseños compactos que ocupan poco espacio.
5. Pueden combinarse con otros tratamientos.
6. No eliminan realmente el contaminante, únicamente lo concentran en otra fase.
7. Pueden darse el caso de incompatibilidades entre el contaminante y la membrana.
8. Problemas de ensuciamiento de la membrana: necesidad de otras sustancias para llevar a cabo la limpieza, ajustes de pH, ciclos de parada para limpieza del equipo.

9. Ruido generado por los equipos necesarios para conseguir altas presiones.

4.1.6.7 Otros tipos de tratamiento.

En la práctica, la aplicación de los métodos de tratamiento debe tener en cuenta fundamentalmente la naturaleza y las propiedades fisicoquímicas de las aguas o efluentes a tratar. Las aguas contaminadas por la actividad humana pueden, en general, ser procesadas eficientemente por plantas de tratamiento biológico, por adsorción con carbón activado u otros adsorbentes, o por tratamientos químicos convencionales. (RODRIGUEZ et al. 2006, Citado por PRATO 2007).

Los procesos de tratamiento de efluentes complejos han sido orientados principalmente a la combinación de sistemas, debido a la poca efectividad mostrada por los procesos biológicos. Por lo tanto, surgen como alternativa los procesos fisicoquímicos (Pretratamientos o post-tratamientos), los cuales suelen incluir floculación y precipitación. (RODRIGUEZ et al. 2006 Citado por PRATO 2007). Algunos de los tratamientos antes mencionados se caracterizan por los altos costos operativos y por transportar al contaminante de un medio a otro, generalmente concentrándolos y por lo tanto aumentando el potencial contaminante.

4.1.7 Procesos avanzados de oxidación (PAOs).

En la actualidad, se está recurriendo en los países industrializados al uso de las llamadas Tecnologías o Procesos Avanzados de Oxidación (PAOs), muy poco aplicados y, peor aún, menos difundidos en los países de economías emergentes como los de América Latina. La mayoría de los PAOs pueden aplicarse a la remediación y descontaminación de aguas residuales biorecalcitrantes, generalmente en pequeña o mediana escala. Los métodos pueden usarse solos, combinados entre ellos o con métodos convencionales, pudiendo ser aplicados también a contaminantes de aire y suelo. (RODRIGUEZ et al. 2006, Citado por PRATO 2007)

Los Procesos Avanzados de Oxidación (PAOs), se basan en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes. El concepto fue inicialmente establecido por Glaze et al., (1987) quienes definieron los PAOs como procesos que involucran la generación y uso de especies transitorias poderosas, principalmente el radical hidroxilo ($\text{HO}\bullet$). Este radical puede ser generado por medios fotoquímicos (lámparas UV y la luz

solar) o por otras formas de energía, y posee alta efectividad para la oxidación de materia orgánica. En la Tabla 6 podemos observar el poder relativo de oxidación de diferentes especies oxidantes entre otros el radical hidroxilo en comparación con el cloro. (DORMENECH et al. 2002, Citado por PRATO 2007)

Tabla 6. Poder de oxidación relativo al cloro.

| ESPECIE | PODER RELATIVO DE OXIDACIÓN |
|---------------------------|--------------------------------|
| Flúor | 2,23 |
| Radical hidroxilo ·OH | 2,06 |
| Oxígeno atómico | 1,78 |
| Ozono | 1,52 |
| Peróxido de hidrógeno | 1,31 |
| Radical perhidroxilo ·OOH | 1,25 |
| Cloro | 1,00 |

Fuente: DOMÉNECH et al. 2002, Citado por PRATO 2007

Las PAOs son especialmente útiles como pretratamiento de contaminantes resistentes a la biodegradación o como proceso de postratamiento para efectuar un pulido de las aguas antes de la descarga a los cuerpos receptores. La explicación de la eficiencia de estas técnicas, está asociada a una mayor factibilidad termodinámica y una velocidad de oxidación incrementada por la participación de radicales, principalmente el radical hidroxilo, HO•. Esta especie posee propiedades adecuadas para atacar virtualmente a todos los compuestos orgánicos y reaccionar 10^6 - 10^{12} veces más rápido que oxidantes alternativos como el O₃. La Tabla 6, que presenta potenciales de oxidación de distintas especies, muestra que después del flúor, el HO• es el oxidante más enérgico. En la Tabla 7 se puede observar la gran diferencia en las constantes de velocidad de reacción de distintos compuestos con el radical hidroxilo y con el ozono. De todos modos, debemos destacar que, para ser eficientes, los PAOs deben generar altas concentraciones de radicales hidroxilo en estado estacionario. (DORMENECH et al. 2002 Citado por PRATO 2007)

Tabla 7. Constantes de velocidad (k en [l/mol-s]) del radical hidroxilo en comparación con el ozono para algunos compuestos orgánicos.

| Compuesto | HO• | O ₃ |
|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Alquenos clorados | 10 ⁹ -10 ¹¹ | 10 ⁻¹ -10 ³ |
| Fenoles | 10 ⁹ -10 ¹⁰ | 10 ³ |
| Aromáticos | 10 ⁸ -10 ¹⁰ | 1-10 ² |
| Cetonas | 10 ⁹ -10 ¹⁰ | 1 |
| Alcoholes | 10 ⁸ -10 ⁹ | 10 ⁻² -1 |
| Alcanos | 10 ⁶ -10 ⁹ | 10 ⁻² |

Fuente: DOMÉNECH et al. 2002, Citado por PRATO 2007

Los PAOs tienen actualmente un grado de desarrollo y comercialización variado, en constante cambio a medida que se avanza científica y tecnológicamente en el tema. Las técnicas de ozonización en medio alcalina, UV/H₂O₂, UV/O₃, UV/H₂O₂/O₃, UV/Fenton y UV/TiO₂ se encuentran total o parcialmente comercializadas. La presencia de contaminantes refractarios justifica el uso de los procesos avanzados de oxidación que facilitan la degradación (biocompatibilización) y permiten el uso posterior de sistemas biológicos para el abatimiento de los compuestos intermedios generados. (BRILLAS et al. 2003, Citado por PRATO 2007)

Ventajas de los procesos avanzados de oxidación POAs

Entre las ventajas de los Procesos Avanzados de oxidación podemos mencionar: (BRILLAS et al. 2003, Citado por PRATO 2007)

1. No cambian de fase al contaminante (como ocurre en el arrastre con aire o en el tratamiento con carbón activado), sino que lo transforman químicamente.
2. Generalmente se consigue la mineralización total o parcial del contaminante.

3. Usualmente no generan lodos que a su vez requieren de un proceso de tratamiento y/o disposición.
4. Son muy útiles para contaminantes refractarios que resisten otros métodos de tratamiento, principalmente el biológico.
5. Sirven para tratar contaminantes a muy baja concentración (por ejemplo, ppb).
6. Son ideales para disminuir la concentración de compuestos formados por Pretratamientos alternativos, como la desinfección.
7. Generalmente, mejoran las propiedades organolépticas del agua tratada.
8. En muchos casos, consumen mucha menos energía que otros métodos (por ejemplo, la incineración).
9. Permiten transformar contaminantes refractarios en productos tratables luego por métodos más económicos como los procesos biológicos.
10. Eliminan efectos sobre la salud de desinfectantes y oxidantes residuales como el cloro.

Los principales objetivos de la aplicación de POAs son:

- Mineralización de los contaminantes, especialmente los orgánicos recalcitrantes, hasta su completa transformación en dióxido de carbono, agua y aniones inorgánicos, evitando la formación de subproductos o residuos (procesos de carácter destructivo). (PRIMO 2008)
- Degradación de contaminantes orgánicos en compuestos más biodegradables y/o menos tóxicos (pretratamiento antes de un proceso biológico).
- Eliminación de color y/o olor.
- Desinfección.

La Tabla 8 muestra un listado de los potenciales de oxidación en medio ácido de los principales oxidantes químicos, en la cual queda reflejado el elevado poder de oxidación de los radicales hidroxilos con respecto a otros oxidantes. (PRIMO 2008)

Tabla 8. Potenciales de oxidación estándar frente al electrodo de hidrógeno de algunos oxidantes químicos en medio ácido a 25 °C.

| Oxidante | E° (V) |
|--|--------|
| Fluoruro (F ⁻) | 3,03 |
| Radical hidroxilo (OH [·]) | 2,80 |
| Oxígeno atómico (O ₂) | 2,42 |
| Ozono (O ₃) | 2,07 |
| Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) | 1,77 |
| Permanganato potásico (KMnO ₄) | 1,67 |
| Ácido hipobromoso (HBrO) | 1,59 |
| Dióxido de cloro (ClO ₂) | 1,50 |
| Ácido hipocloroso (HClO) | 1,49 |
| Cloro (Cl ₂) | 1,36 |
| Bromo (Br ₂) | 1,09 |

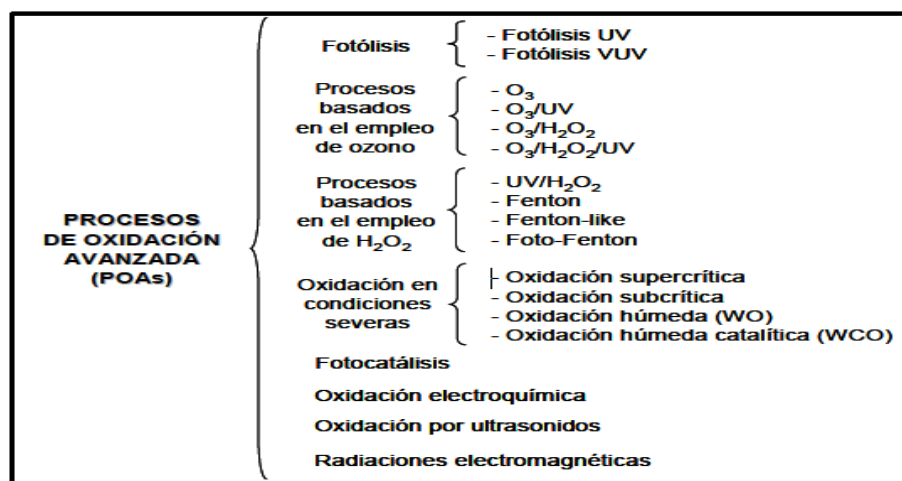
Fuente: BACARDIT 2007, Citado por PRIMO 2008

Muchos POAs se basan en la combinación de un oxidante fuerte (por ejemplo, ozono o peróxido de hidrógeno) con un catalizador (por ejemplo, iones de metales de transición o fotocatalizadores) y/o radiación (por ejemplo, UV o ultrasonidos). (PRIMO 2008).

4.1.7.1 Clasificación de los POAs

Una de las posibles clasificaciones de los POAs es en función de la fuente de generación de la especie oxidante, es decir, el método para generar radicales hidroxilo. Esta clasificación se muestra en el esquema de la Figura 3 donde se recogen los principales tipos de POAs: fotolíticos, basados en el empleo de ozono, basados en el empleo de peróxido de hidrógeno, oxidación bajo condiciones severas, fotocatalíticos, electroquímicos o mediante ultrasonidos. La amplia variedad de técnicas disponibles evidencia la versatilidad de los POAs. Existen publicadas revisiones sobre los fundamentos de cada tipo de POAs como los trabajos de Gogate y Pandit (2004a, 2004b) o el libro editado por PARSONS. 2004 “Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment”.

Figura 4. Clasificación de los procesos de oxidación avanzada.



Fuente: GOGATE Y PANDIT 2004, Citado por PRIMO 2008

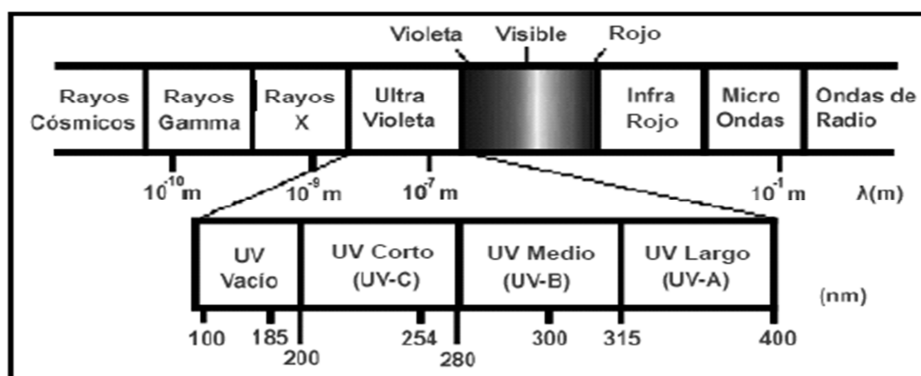
4.1.8 Tipos de POAs

4.1.8.1 Fotólisis

Entre las técnicas de oxidación fotolítica se pueden diferenciar la fotólisis con radiación UV y la llevada a cabo mediante ultravioleta a vacío (VUV). (PRIMO 2008).

Se denomina radiación ultravioleta (UV) a la radiación electromagnética cuya longitud de onda está comprendida aproximadamente entre los 400 nm (4×10^{-7} m) y los 15 nm ($1,5 \times 10^{-8}$ m). Su nombre proviene debido a que su rango empieza desde longitudes de onda más cortas de lo que los humanos identificamos como el color violeta. La figura 4 muestra el espectro de la radiación ultravioleta y los diferentes subtipos en que se divide. (PRIMO 2008).

Figura 5. Espectro de la radiación ultravioleta



Fuente: PRIMO 2008

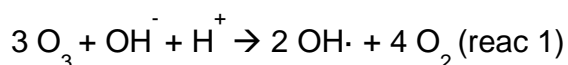
La fot3lisis directa supone la interacci3n de la luz con las mol3culas para provocar su disociaci3n en fragmentos m3s simples. Por esta raz3n, en todo proceso en el que se emplee la radiaci3n UV, la fot3lisis podr3a tener lugar. La intensidad y la longitud de onda de la radiaci3n o el rendimiento cu3ntico del compuesto que se pretende eliminar son factores que influyen en el rendimiento del proceso. Como fuente de radiaci3n UV, habitualmente, se utilizan l3mparas de vapor de mercurio. (OPPENLANDER 2003, Citado por PRIMO 2008).

El proceso UV se basa en las reacciones que tienen lugar bajo el empleo de radiaci3n UV con un espectro de emisi3n comprendido entre 140 y 200 nm. En este caso, las fuentes de radiaci3n generalmente empleadas son l3mparas de exc3meros de xen3n. En estas condiciones, dos procesos de degradaci3n son posibles: la fot3lisis directa de los compuestos org3nicos, y la formaci3n de especies radicales oxidantes como los radicales hidroxilos. (PRIMO 2008).

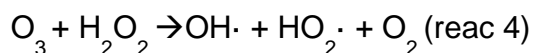
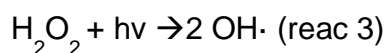
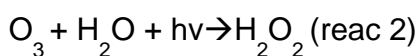
4.1.8.2 POAS basados en el Empleo de Ozono

El ozono es un potente agente oxidante, capaz de reaccionar con un gran número de compuestos orgánicos e inorgánicos. Su alto potencial de oxidación (Tabla 1.2) y la ausencia de la formación de subproductos peligrosos durante el proceso han hecho crecer la importancia de esta técnica en el tratamiento de aguas durante las pasadas décadas. El principal inconveniente es la necesidad de generación de ozono a partir de oxígeno, para lo cual se emplea una descarga eléctrica sobre una corriente de aire u oxígeno puro. Este paso consume grandes cantidades de energía dificultando el escalado del proceso. (PRIMO 2008).

El mecanismo de oxidación mediante ozono es un proceso complejo que tiene lugar por dos vías: reacción directa con el ozono disuelto (O_3) o la oxidación indirecta a través de la formación de radicales ($OH\cdot$). La intensidad de ambos mecanismos durante la degradación de un compuesto depende de factores como la naturaleza del contaminante, la dosis de ozono o el pH del medio. Normalmente, en condiciones ácidas ($pH < 4$) prevalece la ozonización directa (reacción 1) mientras que a $pH > 9$, la vía indirecta es la más importante. (PRIMO 2008).



El tratamiento por ozonización puede mejorar al añadir peróxido de hidrógeno y/o radiación UV al sistema (O_3/H_2O_2 , O_3/UV , $O_3/H_2O_2/UV$). De este modo se consiguen reducir los tiempos de operación y los costes del proceso. (PRIMO 2008).



4.1.8.3 POAS basados en el empleo de Peróxido de Hidrógeno

El peróxido de hidrógeno es un reactivo químico seguro, abundante y de sencillo manejo, ampliamente usado para la prevención de la contaminación [www.h2o2.com]. Sin embargo, por si mismo no posee unas buenas propiedades oxidantes, sino que debe ser combinado con otras sustancias o catalizadores para incrementar su eficacia. (PRIMO 2008).

En este grupo de POAs se encuentran el proceso Fenton y todas sus variaciones (Fenton-like, foto-Fenton, electro-Fenton) y el proceso UV/H₂O₂.

Este trabajo está enfocado en el estudio de POAs basados en el uso de H₂O₂ como la combinación UV/H₂O₂, el proceso Fenton y el proceso foto-Fenton. (PRIMO 2008).

POAS en Condiciones de Operación Severas

Dentro de este grupo se encuentran las técnicas de oxidación denominadas: oxidación húmeda y sus variantes, oxidación supercrítica y oxidación subcrítica. Estos procesos se diferencian del resto de POAs por sus severas condiciones de operación (elevadas presiones y temperaturas) y por la concentración de contaminantes en las aguas residuales que se someten al tratamiento, generalmente más elevadas. (PRIMO 2008).

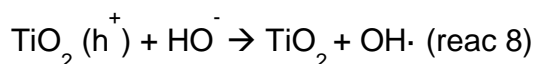
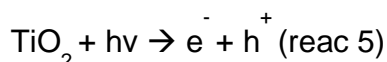
La oxidación supercrítica tiene lugar por encima del punto crítico correspondiente al agua (T > 375 °C y P > 22,1 MPa), mientras la oxidación subcrítica opera en un rango de temperatura entre 125 y 300 °C y presiones de 0,5 a 20 MPa. (BACARDIT 2007, Citado por PRIMO 2008)

La oxidación húmeda (WO) implica la degradación de la materia orgánica a elevada presión y temperatura mediante el empleo de oxígeno gas o aire. Cuando el oxígeno se sustituye por peróxido de hidrógeno se habla de oxidación húmeda con peróxido (WPO). En este caso, las condiciones de operación son menos severas reduciéndose los costes. La eficacia de la oxidación húmeda se puede mejorar mediante la utilización de catalizadores metálicos, siendo denominada en este caso oxidación húmeda catalítica (WCO). (PRIMO 2008).

4.1.8.4 Fotocatálisis Heterogénea

La fotocatálisis se define como la aceleración de una reacción fotoquímica por la presencia de un metal semiconductor que es activado mediante la absorción de radiación con una energía por encima de su salto de banda. El término heterogéneo hace referencia a que los contaminantes están presentes en una fase fluida mientras el catalizador está en fase sólida. El catalizador más empleado es el dióxido de titanio (TiO_2) debido a su elevada estabilidad química, su bajo coste y los excelentes resultados que ha demostrado proporcionar (PRIMO 2008).

La primera reacción del proceso de fotocatálisis es la absorción de la radiación UV por el catalizador, con la formación de pares hueco-electrón según la reacción 5. Estos electrones, debido a su alto poder reductor, reducen el oxígeno adsorbido formando el ion radical súperóxido ($\text{O}_2^{\cdot -}$), como recoge la reacción 6 mientras que los huecos son capaces de provocar la oxidación de las especies adsorbidas H_2O y/o OH^- a radicales $\text{OH}\cdot$ de acuerdo a las reacciones 7 y 8 que serán los que posteriormente oxidan la materia orgánica. Cuando la materia orgánica también se adsorbe en la superficie del catalizador, puede ser directamente oxidada por transferencia de un electrón del metal del catalizador. (BACARDIT 2007, Citado por PRIMO 2008)

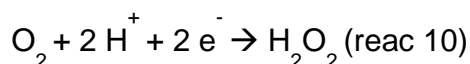
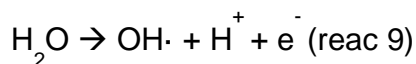


Las mayores ventajas de este POA son que trabaja a presión y temperatura ambiente, la posibilidad de utilizar la luz solar para la irradiación del catalizador y el bajo coste del catalizador. Además, este sistema es capaz de alcanzar la mineralización completa de muchos compuestos. Sin embargo, presenta desventajas importantes como las dificultades a mayor escala para conseguir alcanzar una radiación uniforme en toda la superficie del catalizador o la

necesidad de un tratamiento posterior de separación para recuperar el catalizador en suspensión, lo cual encarece el proceso. (PRIMO 2008).

4.1.8.5 Oxidación Electroquímica

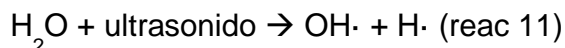
La aplicación de corriente eléctrica (de 2 a 20 A) entre dos electrodos en agua produce la generación de radicales hidroxilo $\text{OH}\cdot$ y la producción de peróxido de hidrógeno en el medio de reacción. Los radicales $\text{OH}\cdot$, que son los que oxidan la materia orgánica, se forman debido a la oxidación de las moléculas de agua en el ánodo (reacción 9), mientras que el peróxido de hidrógeno se genera por la reducción del oxígeno en el cátodo (reacción 10). (PRIMO 2008).



El uso de la oxidación electroquímica está limitado debido a los elevados costes de operación. La eficacia del sistema se puede mejorar agregando Fe (II) , en el proceso que se conoce como electro-Fenton. Si se usa un ánodo de sacrificio de hierro, que provee de cantidades estequiométricas para la reacción Fenton, entonces el proceso se denomina peroxicoagulación. (PRIMO 2008).

Oxidación Mediante Ultrasonidos

La oxidación mediante ultrasonidos (o cavitación acústica) es uno de los POAs menos estudiado. Su fundamento es la generación de burbujas de cavitación. La cavitación se define como el fenómeno de formación, crecimiento y colapso de microburbujas o cavidades que tiene lugar en un intervalo muy corto de tiempo (milisegundos) y libera gran cantidad de energía [Gogate y Pandit, 2004a]. Cada burbuja actúa como un microreactor con condiciones de operación supercríticas. En un sistema acuoso sometido a ondas de ultrasonidos con una frecuencia de 20 Hz, cada burbuja de cavitación, puede alcanzar los 4000 K de temperatura y 1000 bares de presión, condiciones capaces de provocar la ruptura de los enlaces químicos. Los compuestos orgánicos disueltos se vaporizan en el interior de las burbujas y se degradan por pirólisis, mientras el vapor de agua de las burbujas se descompone en átomos de hidrógeno y radicales $\text{OH}\cdot$ (PRIMO 2008).



Así, la degradación de los compuestos orgánicos puede tener lugar mediante la acción de radicales hidroxilo (mecanismo de oxidación) o debido a las elevadas temperaturas (mecanismo pirolítico). (PRIMO 2008).

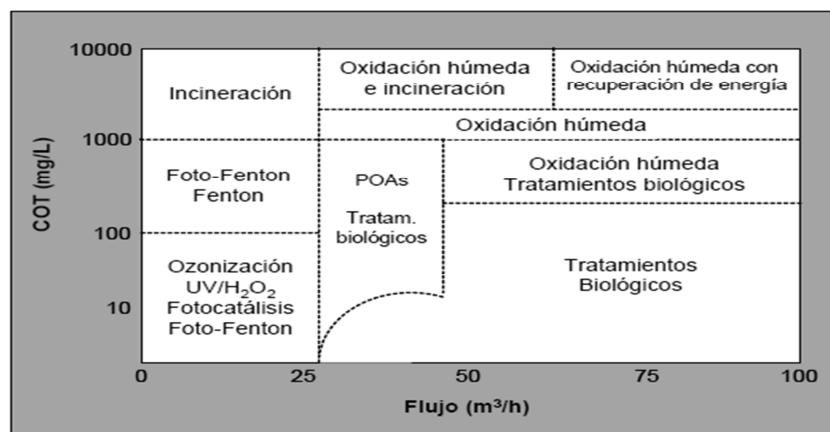
Oxidación mediante Radiaciones Electromagnéticas de Alta Frecuencia

Los procesos que emplean radiaciones electromagnéticas de alta frecuencia se basan en la interacción de los electrones acelerados con los átomos y moléculas del medio, generando de esta manera formas excitadas y especies radicalarias. Los radicales libres formados oxidan la materia orgánica. Esta técnica es empleada con propósitos de desinfección, donde la radiación interactúa con membranas celulares, enzimas o ácidos nucleicos destruyendo microorganismos. (PRIMO 2008).

4.1.8.6 Consideraciones sobre el Rango de Aplicación de los POAs

Una recomendación del rango de aplicación de los diferentes tipos de POAs se recoge en la figura 5 [Bacardit, 2007]. Dicha figura indica un posible rango de aplicación de cada proceso en función de la carga de materia orgánica y el flujo de corriente residual a tratar. Cada área muestra el proceso más eficaz dentro de sus límites. Se ha de tener en cuenta que los valores mostrados se indican como guía general, pero cada caso debe ser considerado individualmente. (PRIMO 2008).

Figura 6. Rango de aplicación de diferentes tecnologías de oxidación.



Fuente: BACARDIT 2007, Citado por PRIMO 2008

4.1.8.6.1 POAs como “Green Processes”

Según PRIMO 2008, los procesos de oxidación avanzada (POAs) han sido considerados como procesos de tratamiento afines a los principios de la química sostenible, es decir, respetuosos con el medioambiente. Algunas de las razones para sostener esta afirmación son:

- Muchos POAs no generan subproductos (son procesos destructivos capaces de alcanzar la mineralización completa) ni residuos.
- Emplean reactivos químicos inocuos.
- Son procesos catalizados.
- Permiten el empleo de fuentes de energía renovables como la radiación solar.
- Pueden llevarse a cabo a temperatura y presión ambiente.
- Poseen una alta versatilidad.

4.1.8.7 Combinación de POAs y Tratamientos Biológicos

Los POAs implican elevados costes si los comparamos con tratamientos de tipo biológico. Estos procesos de oxidación emplean normalmente altas cantidades de reactivos y, en ocasiones, requieren altos consumos de energía, por lo que los costes de operación son elevados. Sin embargo, en ciertas ocasiones como por ejemplo cuando la solución a tratar contiene compuestos de carácter no biodegradable y/o tóxico o contiene bajas concentraciones de materia orgánica, su uso se hace necesario. Una solución económicamente atractiva consiste en la combinación de algún POAs, capaz de incrementar la biodegradabilidad de las aguas, con un post-tratamiento biológico, proceso que presenta la mejor relación coste – eficacia. (PRIMO 2008).

Se ha de encontrar la mejor forma de combinar ambos tratamientos de modo que se minimicen los costes del POAs pero se alcancen las condiciones adecuadas para realizar el proceso biológico. Con objeto de determinar la compatibilidad, existen diferentes técnicas para medir la biodegradabilidad de un agua [. Los test de respirometría o el test de Zahn-Wellns se usan comúnmente con este propósito. En muchos trabajos, la relación entre la demanda biológica de oxígeno y la demanda química de oxígeno (DBO/DQO) se emplea como parámetro indicador de la mejora de la biodegradabilidad. Esta relación indica que fracción de la materia orgánica total presente en el agua residual es susceptible de ser descompuesta biológicamente. Por lo tanto, el parámetro DBO/DQO se puede utilizar como estimación del grado de biodegradabilidad de un agua residual. Los siguientes valores son dados como guía. (GARCÍA-MONTAÑO 2007, Citado por PRIMO 2008).

- $DBO/DQO > 0,59$ – contenido orgánico fácilmente biodegradable
- $DBO/DQO \approx 0,1 - 0,59$ – contenido orgánico parcialmente biodegradable
- $DBO/DQO < 0,1$ – contenido orgánico persistente, no biodegradable

DBO y DQO son dos parámetros globales relacionados con el contenido en materia orgánica, bien definidos y con métodos de análisis estandarizados que no requieren complicados sistemas. (PRIMO 2008).

Otra posibilidad consiste en la utilización de un POA como post-tratamiento después de un proceso biológico donde se ha eliminado la mayor parte de la materia orgánica reduciendo los costes asociados al POA al ser su carga inicial sensiblemente menor. Adicionalmente, un tratamiento físico-químico como la adsorción con carbón activo puede emplearse para completar el tratamiento del efluente del POA, ya que normalmente contiene una alta fracción de compuestos orgánicos de bajo peso molecular. (PRIMO 2008).

4.1.9 Proceso UV/H₂O₂

4.1.9.1 Fundamentos

Según PRIMO 2008, este POA se basa en la formación de radicales hidroxilo a partir de la fotólisis del peróxido de hidrógeno y las reacciones de propagación asociadas a este fenómeno. Las principales reacciones de este mecanismo son las siguientes:

| | |
|-------------|--|
| INICIACIÓN | $\text{H}_2\text{O}_2 + h\nu \rightarrow 2 \text{OH}\cdot \text{ (reac 12)}$ $\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \text{ (reac 13)}$ |
| PROPAGACIÓN | $\text{OH}\cdot + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2\cdot + \text{H}_2\text{O} \text{ (reac 14)}$ $\text{HO}_2\cdot + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{OH}\cdot + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \text{ (reac 15)}$ $\text{HO}_2\cdot + \text{HO}_2\cdot \rightarrow \text{OH}\cdot + \text{HO}^- + \text{O}_2 \text{ (reac 16)}$ |
| TERMINACIÓN | $\text{OH}\cdot + \text{HO}_2\cdot \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \text{ (reac 17)}$ $\text{OH}\cdot + \text{OH}\cdot \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 \text{ (reac 18)}$ |

El valor de la absorptividad del peróxido de hidrógeno a 253,7 nm es aproximadamente igual a $20 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ y la formación de los radicales tiene lugar a causa de los fotones incidentes absorbidos. Se pueden utilizar dos tipos diferentes de lámparas UV: policromáticas, con un rango de emisión comprendido entre 180 y 400 nm, o monocromáticas (254 nm), más específicas para obtener un mayor

rendimiento en la fotólisis del peróxido. (GARCÍA-MOLINA 2006, Citado por PRIMO 2008).

4.1.9.2 Parámetros que Influyen en el Proceso

- La concentración de peróxido de hidrógeno:

Es de suma importancia determinar la dosis adecuada de peróxido de hidrógeno tanto para alcanzar la máxima eficacia del proceso como desde un punto de vista económico. La eficacia tiende a aumentar con la concentración de H_2O_2 . Sin embargo, existe una concentración, a partir de la cual un incremento de la dosis no se corresponde con un aumento de la eficacia. Esto se debe a la aparición de reacciones secundarias donde el peróxido actúa como inhibidor de los radicales hidroxilo (reacción 14) formando radicales $HO_2\cdot$ mucho menos reactivos. (PRIMO 2008).

- pH del medio de reacción, donde normalmente se trabaja en rangos bajos (2,5 – 3,5) para obtener mejores eficacias. (PRIMO 2008).

- Presencia de aniones “secuestradores” de radicales hidroxilo (carbonatos, bicarbonatos, sulfatos y otros aniones inorgánicos). (PRIMO 2008).

- Intensidad de radiación UV, dependiente del tipo de lámpara empleada y la geometría del reactor. (PRIMO 2008).

- Transmitancia de la radiación a través de la solución, marcada por la turbidez y el color así como por la presencia de sólidos en suspensión que provocan un efecto de apantallamiento impidiendo la correcta incidencia de la luz sobre la solución. También la presencia de compuestos en la solución con una alta absorbancia pueden competir con el peróxido de hidrógeno por la radiación UV incidente. (PRIMO 2008).

4.1.9.3 Ventajas e Inconvenientes

El peróxido de hidrógeno es un reactivo seguro, abundante y de sencillo manejo en comparación por ejemplo con los problemas asociados a los procesos de ozonización. Además, existe la posibilidad de obtener la radiación de una fuente

de energía renovable como la radiación solar, fomentando el empleo de procesos más sostenible. (PRIMO 2008).

En comparación con la fotólisis directa o el uso de H_2O_2 como oxidante, la combinación UV/ H_2O_2 presenta una mayor eficacia debido a la formación de radicales $\text{OH}\cdot$ (PRIMO 2008).

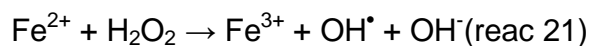
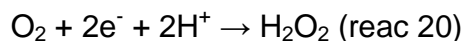
Comparado con el ozono, la velocidad de fotólisis del peróxido de hidrógeno es más lenta. Por esta razón, el proceso UV/ H_2O_2 requiere dosis de reactivo relativamente altas y/o mayores tiempos de radiación que por ejemplo el proceso UV/ O_3 . (PRIMO 2008).

Cuando existen en la disolución otros compuestos capaces de absorber radiación UV y/o una alta turbidez, el efecto es similar al que ocurre al disminuir el flujo de radiación incidente, es decir, hay menos radiación disponible para la fotólisis del H_2O_2 o la cantidad de radiación transformada en radicales $\text{OH}\cdot$ es menor. (PRIMO 2008).

4.1.10 Procesos Fenton y Foto Fenton

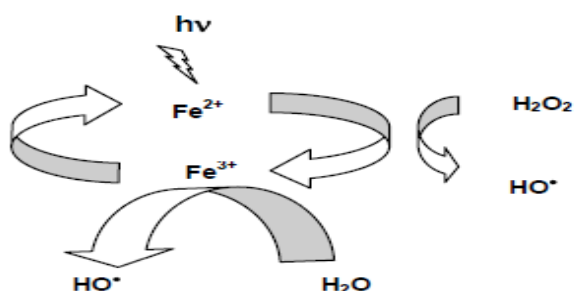
La reacción Fenton se ve muy favorecida por la irradiación con luz UV-visible, éste tipo de reacción fotoasistida se denomina reacción foto Fenton. La hidrólisis del Fe (III) es un proceso bastante complejo y se ha observado que el $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ es la especie dominante en una solución de Fe (III) recientemente preparada en un rango de pH comprendido entre 2.9-3.5. Para valores de $\text{pH} < 4$. (ZEPP et al.1992, Citado por PRATO 2007)

El Foto Fenton, se produce al catalizar el peróxido de hidrógeno con hierro, dando como resultado la formación de radicales libres altamente reactivos del oxhidrilo ($\text{OH}\cdot$). Es una reacción llamada así por su descubridor en 1894, Henry John Horstman Fenton (1854-1929). Se cree, que el agente responsable de la destrucción del contaminante es el radical $\text{HO}\cdot$, formado por la disociación fotoquímica de los complejos Fe (III)-hidroxi, la reacción se da de la siguiente manera. (PRATO 2007)



La representación esquemática del proceso foto Fenton se muestra a continuación: (PRATO 2007)

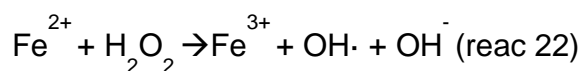
Figura 7. Presentación esquemática de los procesos Foto-Fenton



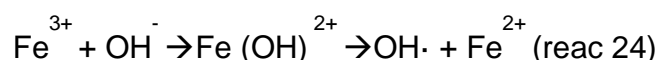
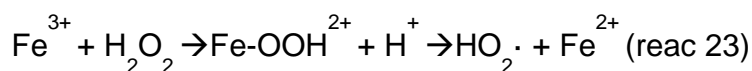
Fuente: PRATO 2007

El proceso Fenton ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$) tiene lugar en ausencia de luz ultravioleta (dark conditions) mientras que el llamado proceso foto-Fenton ($\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$) se basa en la adición de radiación al reactivo Fenton. (PRIMO 2008)

La reacción entre el hierro (II) y el peróxido de hidrógeno en medio ácido da paso a la oxidación del hierro (II) a hierro (III) y a la formación de radicales OH^{\bullet} de acuerdo a la reacción 22 [Muñoz, 2006; García-Montaña, 2007]. Esta reacción tiene lugar de forma espontánea y en ausencia de luz. (PRIMO 2008)



Sin embargo, el comportamiento del sistema no puede ser explicado únicamente en base a la reacción 1.19. De hecho, estudios posteriores han mostrado que, a un valor de pH adecuado, la reducción del Fe^{3+} a Fe^{2+} es posible, según las reacciones 23 y 24: (PRIMO 2008)



Estas reacciones permiten la regeneración del Fe^{2+} , que puede volver a tomar parte en la reacción 22 para generar nuevos radicales hidroxilo. Sin embargo, estas últimas reacciones ocurren a una velocidad bastante más lenta, disminuyendo progresivamente la cantidad de Fe^{2+} disponible en el medio. Además, el Fe^{3+} puede formar complejos con muchos ligandos orgánicos e inorgánicos, secuestrando al hierro de la cadena de reacciones. Es de especial importancia, mencionar los complejos del Fe^{3+} con los ácidos carboxílicos dado que estos compuestos aparecen frecuentemente como intermedios durante el proceso de oxidación. Finalmente, cabe destacar que tras mucho tiempo bajo investigación, el complejo mecanismo de oxidación Fenton sigue estando en discusión, especialmente en cuanto a las formas intermedias de los reactivos. Un mecanismo de reacción basado en tres etapas diferenciadas de iniciación, propagación y terminación es el que ha sido propuesto más comúnmente. (PIGNATELLO et al. 2006, Citado por PRIMO 2008)

En presencia de radiación ultravioleta, se observa un aumento de la velocidad de oxidación de los compuestos orgánicos mediante el proceso Fenton. Bajo estas condiciones, la fotólisis de los complejos de Fe^{3+} permite una mayor regeneración del Fe^{2+} . Además, se genera otra vía para la formación de radicales hidroxilo a partir de la fotólisis del peróxido de hidrógeno. Estas reacciones tienen lugar desde longitudes de onda correspondientes a la región UV-A del espectro hasta la región visible (300 – 580 nm). Por lo tanto, este proceso podría ser llevado a cabo bajo radiación solar permitiendo una reducción del coste. Otra ventaja, es que la concentración de hierro (II) puede ser menor que la empleada en el proceso Fenton, con la consecuente reducción del coste asociado al tratamiento. (PRIMO 2008)

4.1.10.1 Parámetros Que Influyen En El Proceso

Las condiciones de operación en que el proceso se lleva a cabo así como la composición del agua residual afectan sustancialmente a la eficacia y velocidad del proceso de oxidación. Los principales parámetros que influyen en el proceso son: (PRIMO 2008)

4.1.10.2 PH

El sistema Fenton depende del pH del medio de reacción. La velocidad de las reacciones tiende a ser máxima en un pH cercano a 3,0. A pH altos, la velocidad disminuye debido a la precipitación de hierro en forma de $\text{Fe}(\text{OH})_3$. La formación de complejos de hierro se inicia para $\text{pH} > 4,0$. A pH excesivamente bajos ($\text{pH} < 2,0$), se produce la formación de $\text{Fe}(\text{OOH})^{2+}$ que reacciona muy lentamente con el H_2O_2 obstaculizando la generación de $\text{OH}\cdot$. Además, disminuye el coeficiente de absorción de los complejos de hierro.

4.1.10.3 Relación $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$

La dosis de H_2O_2 influye fundamentalmente sobre la eficacia del proceso mientras la concentración de hierro afecta a la cinética. Tanto la eficacia como la velocidad de reacción tienden a aumentar con la concentración de reactivos. Sin embargo, un exceso tanto de hierro como de peróxido da lugar a una disminución de la eficacia debido a la activación de reacciones secundarias no deseadas. Aunque existen numerosos estudios, no se ha encontrado una relación universal para alcanzar los mejores resultados en el proceso. Cada caso depende de la naturaleza y la composición de las aguas a tratar, así como del grado de oxidación que se desea alcanzar. (PRIMO 2008)

4.1.10.4 Temperatura

El aumento de la temperatura supone por lo general un incremento en la velocidad de las reacciones de oxidación. (PRIMO 2008)

4.1.10.5 Concentración de aniones inorgánicos

Ciertos aniones inorgánicos actúan como inhibidores de la acción de los radicales $\text{OH}\cdot$ o forman especies no reactivas con el hierro. Algunos estudios han mencionado la disminución de la velocidad del proceso debido a la presencia en altas concentraciones de sulfatos, cloruros, nitratos, percloratos o hidrogeno fosfatos. (PRIMO 2008).

4.1.10.6 Intensidad de la Luz

Es la cantidad de energía emitida ya sea por una fuente natural como el sol o una artificial como la de una lámpara. La velocidad de la reacción es proporcional a la intensidad de la luz recibida ya que esta promueve la recombinación de los electrones huecos presentes en la muestra.

4.1.10.7 Ventajas E Inconvenientes

La aplicación de los procesos Fenton y foto-Fenton al tratamiento de aguas residuales cuenta con las siguientes ventajas: (PRIMO 2008)

- El proceso se lleva a cabo a presión y temperatura ambiente. (PRIMO 2008)
- Todas las reacciones tienen lugar en fase homogénea con lo cual no existen limitaciones relacionadas con la transferencia de materia. (PRIMO 2008)
- El hierro es un elemento abundante y no tóxico. (PRIMO 2008)
- El peróxido de hidrógeno es sencillo de transportar y manejar. Además, en forma diluida, no causa impacto en el medio receptor. (PRIMO 2008)
- El equipamiento y mantenimiento de una planta de tratamiento Fenton es sencillo en comparación con otros POAs. (PRIMO 2008)
- El proceso foto-Fenton puede emplear radiación en un amplio margen del espectro, en comparación con otros POAs como la fotocatalisis. (PRIMO 2008)

- El proceso foto-Fenton puede realizarse bajo radiación solar, una fuente renovable y barata de energía. (PRIMO 2008)

Por otra parte, las siguientes desventajas deben ser tenidas en cuenta: (PRIMO 2008)

- El proceso requiere un estricto control del pH. (PRIMO 2008)
- Cuando el proceso finaliza, se necesita una etapa de neutralización para separar el hierro, generando un lodo que se ha de gestionar adecuadamente. (PRIMO 2008)
- El proceso Fenton no es capaz de lograr una completa mineralización de todos los contaminantes orgánicos, pero si un incremento de la biodegradabilidad. Algunos de los compuestos identificados como resistentes a la reacción Fenton son: ácidos orgánicos de cadena corta (acético, oxálico, fórmico, maleico, fumárico), algunos aldehídos, cloroformo y acetona. (PRIMO 2008)
- El proceso foto-Fenton, cuando se emplean lámparas UV como fuente de radiación, implica un aumento en los costes. (PRIMO 2008)

4.2 MARCO DE ANTECEDENTES

Los procesos de oxidación avanzada son considerados como unos de los más poderosos tratamientos para degradar los compuestos refractarios que contienen los lixiviados estabilizados. Durante el tratamiento, estos compuestos orgánicos son convertidos por la acción de los radicales hidroxilo en CO_2 y H_2O o transformados en compuestos menos peligrosos susceptibles de ser eliminados usando tratamientos biológicos. (PRIMO 2008)

La aplicación de los procesos de oxidación avanzada al tratamiento de lixiviados de vertedero ha sido recogida en la literatura. De especial interés resultan las detalladas revisiones realizadas en dicha materia por Centrando nuestra atención en los procesos Fenton y foto-Fenton, Deng y Englehardt (2006) han publicado una revisión relativa al tratamiento de lixiviados mediante el proceso Fenton. Las siguientes tablas recogen algunos de los trabajos más destacados publicados recientemente sobre la aplicación de estos procesos a la depuración de lixiviados. (WANG et al. 2003, Citado por PRIMO 2008)

Tabla 8. Tratamientos de lixiviados a vertederos mediante UV/H₂O₂, Fenton y foto fenton.

| Referencia | POA | Características del lixiviado | Condiciones de operación óptimas | Reducción DQO | Otros resultados destacados |
|---------------------------------|----------------------------------|--|---|----------------------------|--|
| Koh et al. (2004) | UV/H ₂ O ₂ | Alemania pre-tratamiento biológico DQO = 920 mg/L DBO ₅ = 4,5 mg/L | pH = 4,0, t = 8 h H ₂ O ₂ = 1000 mg/L 7 UV LP 0,30 w 254 nm UV MP 1,0 kW | 64 % (LPUV) 58 % (MPUV) | Combinación con proceso biológico y ensayos de toxicidad. Reactor con recirculación |
| Lopes de Moraes y Zamora (2005) | Foto-Fenton | Curitiba (Brasil) DQO = 5200 ± 27 mg/L DBO ₅ = 720 ± 81 mg/L N-Kjeldahl = 1114 ± 42 mg/L | pH = 2,8, t = 60 min H ₂ O ₂ = 2000 mg/L Fe ²⁺ = 10 mg/L UV MP 125 w 3,2×10 ⁻³ einstein L ⁻¹ s ⁻¹ | 57 % | Diseño factorial de experimentos y cambios en la biodegradabilidad |
| Lopez et al. (2004) | Fenton | Italia DQO = 10540 mg/L DBO ₅ = 2300 mg/L N-NH ₄ ⁺ = 5210 mg/L | pH = 3,0, t = 2 h H ₂ O ₂ = 10000 mg/L Fe ²⁺ = 830 mg/L | 60 % | Ácidos orgánicos como productos finales y mejora de la biodegradabilidad |
| Pala y Erden (2004) | Fenton | Izmir (Turquia) DQO = 20800 mg/L | pH = 3,0, t = 30 min H ₂ O ₂ = 2500 mg/L Fe ²⁺ = 500 mg/L | 79 % | Combinación con adsorción en carbón activo |

Fuente: DENG Y ENGLEHARDT 2006, Citado por PRIMO 2008

Tabla 9. Trabajos de tratamientos de lixiviados a vertederos mediante UV/H₂O₂, Fenton y foto Fenton

| Referencia | POA | Características del lixiviado | Condiciones de operación óptimas | Reducción DQO | Otros resultados destacados |
|-------------------------|--------|---|---|---------------|---|
| Barnes et al. (2007) | Fenton | Jiangsu (China) DQO = 4113 – 9257 mg/L DBO ₅ = 1440 – 3192 mg/L N-NH ₄ ⁺ = 2132 - 2388 mg/L | pH = 4,0, t = 30 min H ₂ O ₂ = 3500 mg/L Fe ²⁺ = 437,5 mg/L | 76 % | Comparación con precipitación de estruvita. Influencia del pH y H ₂ O ₂ /Fe ²⁺ |
| Calli et al. (2005) | Fenton | Estambul (Turquía) DQO = 20700 mg/L DBO ₅ = 12200 mg/L N-NH ₄ ⁺ = 2330 mg/L | pH < 4,0, t = 3 h H ₂ O ₂ = 2000 mg/L Fe ²⁺ = 1000 mg/L | 85 % | Post-tratamiento (tras biológico, COD = 2000 mg/L) |
| Deng (2007) | Fenton | Florida (EEUU) DQO = 1100 – 1300 mg/L DBO ₅ /DQO = 0,05 N-NH ₄ ⁺ = 300 mg/L | pH = 3,0, t = 120 min H ₂ O ₂ /Fe ²⁺ = 3,0 (molar) | 61 % | Influencia del pH, H ₂ O ₂ /Fe ²⁺ y modo de alimentación. Papel de la coagulación. |
| Di Iaconi et al. (2006) | Fenton | Apulia (Italia) DQO = 23000 mg/L N-NH ₄ ⁺ = 3190 mg/L | pH = 3,0, t = 150 min DQO ₀ = 4500 mg/L H ₂ O ₂ = 5000 mg/L Fe ²⁺ = 15000 mg/L | 85 % | Combinación con proceso biológico |

Fuente: DENG Y ENGLEHARDT 2006, Citado por PRIMO 2008

Tabla 10. Trabajos de tratamientos de lixiviados a vertederos mediante UV/H₂O₂, Fenton y foto Fenton.

| Referencia | POA | Características del lixiviado | Condiciones de operación óptimas | Reducción DQO | Otros resultados destacados |
|-----------------------|----------------------------------|---|--|--|---|
| Rivas et al. (2004) | Fenton | Badajoz (España) DQO = 7400 – 8800 mg/L DBO ₅ = 475 ± 25 mg/L N-Kjeldahl = 99,5 ± 5 mg/L | pH = 3,5 H ₂ O ₂ = 1,0 M Fe ³⁺ = 0,02 M | > 90 % (tras neutralización) | Etapas previas de acidificación y precipitación con Fe ³⁺ |
| Shu et al. (2006) | UV/H ₂ O ₂ | Shalu (Taiwan) DQO = 3750 mg/L | t = 300 min H ₂ O ₂ = 232,7 M 4 UV LP 36 w 254 nm | 65 % | Influencia de H ₂ O ₂ , UV, DQO ₀ |
| Tengrui et al. (2007) | Fenton | Chongqing (China) DQO = 1500 - 2500 mg/L DBO ₅ = 50 - 100 mg/L N-NH ₄ ⁺ = 1100 mg/L | pH = 3,0, t = 90 min H ₂ O ₂ /Fe ²⁺ = 2,5 (molar) | 75 % | Influencia del pH, t, T, Fe ²⁺ y H ₂ O ₂ |
| Zhang et al. (2005) | Fenton | Delaware (EEUU) DQO = 8298 – 8894 mg/L COT = 2040 – 2207 mg/L | pH = 2–3, t = 30 min H ₂ O ₂ /Fe ²⁺ = 1,5 (molar) | 61 % (DQO _{exp_o} = 1000 mg/L) | Influencia del pH, Fe ²⁺ , H ₂ O ₂ /Fe ²⁺ , T y modo de alimentación |
| Zhang et al. (2006) | Fenton | Delaware (EEUU) DQO = 8298 – 8894 mg/L | pH = 2,5, T = 25 °C HRT = 60 min H ₂ O ₂ /Fe ²⁺ = 3,0 (molar) | 89 % (DQO _{exp_o} = 1000 mg/L) | Funcionamiento en continuo. Influencia del pH, T, H ₂ O ₂ /Fe ²⁺ , DQO ₀ |

Fuente: DENG Y ENGLEHARDT 2006, Citado por PRIMO 2008

En los últimos años, se han desarrollado diferentes tecnologías para cumplir con los cada vez más estrictos límites de descargas establecidos en la legislación, entre los cuales se incluyen tratamientos biológicos, físicos químicos y de oxidación avanzada. (PRIMO 2008)

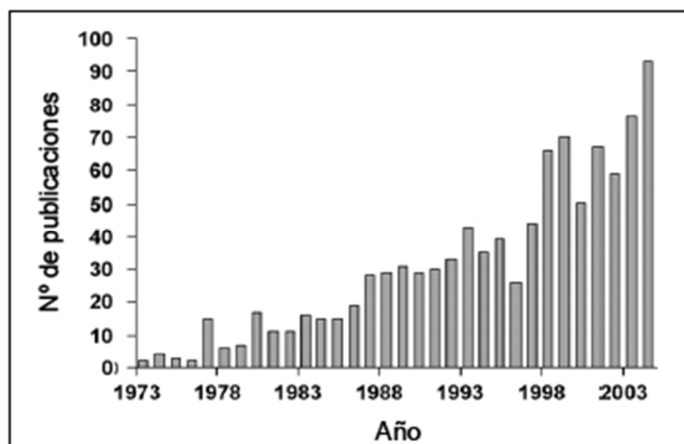
Debido a su fiabilidad, simplicidad y buena relación coste – eficacia, los tratamientos de tipo biológico son los comúnmente usados para la remediación de lixiviados. Sin embargo, cuando se trabaja con lixiviados estabilizados (poco biodegradables), los procesos biológicos pueden no lograr alcanzar las reducciones necesarias de DQO debido al carácter recalcitrante de los compuestos orgánicos presentes en este tipo de efluentes. La actividad biológica también puede ser inhibida por algunos compuestos de carácter tóxico. Por esta razón, la búsqueda de otras tecnologías eficaces para el tratamiento de lixiviados de vertedero se ha intensificado en los últimos años. (PRIMO 2008)

Los tratamientos físico-químicos han demostrado su eficacia no solo para la eliminación de las sustancias refractarias del lixiviado maduro, sino también como etapa final de afino tras un proceso biológico. Antes de su descarga, el efluente es sometido a un proceso físico-químico adicional como: precipitación, coagulación – floculación, adsorción con carbón activo, intercambio iónico o filtración con membranas. Los mayores inconvenientes de estas tecnologías son el encarecimiento de costes por el consumo de reactivos y los requerimientos energéticos, y la transferencia de la contaminación de una fase a otra sin solucionar definitivamente el problema medioambiental. Varios autores han revisado la aplicación de este conjunto de procesos al tratamiento de lixiviados de vertedero. (PRIMO 2008)

Los procesos de oxidación avanzada se presentan como una alternativa eficaz para la mineralización de los compuestos orgánicos recalcitrantes en los lixiviados por su elevada capacidad y velocidad de oxidación. Sin embargo, estas técnicas aplicadas a gran escala, generalmente, no son aceptables económicamente. La combinación de los POAs con tratamientos biológicos reduciría los costes considerablemente, pero la compatibilidad de los dos procesos debe de ser probada. (PRIMO 2008)

La figura 8 muestra la evolución del número de publicaciones anuales relacionadas con el tratamiento de lixiviados de vertedero aparecidas en revistas científicas internacionales desde 1973. (PRIMO 2008)

Figura 8. Evolución de trabajos publicados a nivel mundial relacionados con el tratamiento de lixiviados de vertedero desde 1973



Fuente: RENOU et al.2007, Citado por PRIMO 2008

5. DISEÑO METODOLÓGICO

Esta investigación es de tipo explicativa experimental. La investigación se realizó en el laboratorio del Centro de Investigación de Tecnologías Ambientales, CITA. El objetivo principal fue determinar la eficiencia de remoción de la Demanda Química de Oxígeno, DQO, del lixiviado maduro del relleno el Henequén tratado con oxidación avanzada fotofenton a través de las fases que se describirán a continuación:

5.1 Fase 1

Se construyó un reactor a escala laboratorio para realizar el proceso de evaluación del POA- fotofenton. Para poder llevar a cabo esta fase se hicieron necesarias las siguientes etapas:

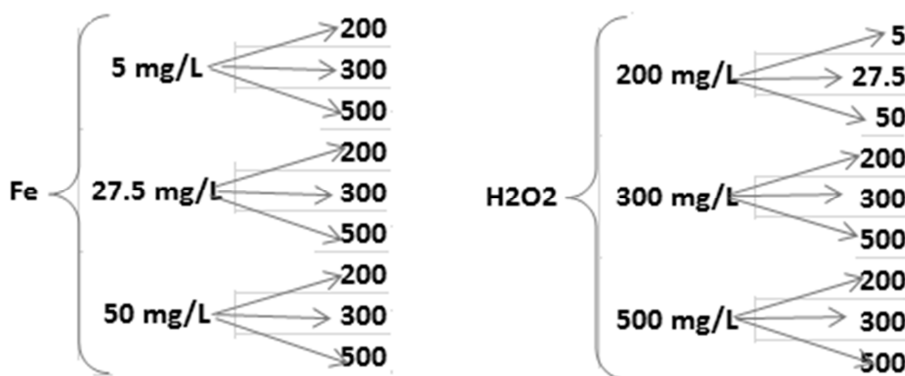
- Se hizo revisión bibliográfica de textos, investigaciones, publicaciones, artículos científicos, entre otros documentos anteriores y actuales que hicieran referencia a la construcción de un reactor a escala laboratorio para la evaluación POA- fotofenton
- Se realizó selección de las publicaciones más relevantes relacionadas con el tema
- Se escogieron los materiales apropiados para el montaje y se definió: tipos y dimensiones de los tubos, así como los reactivos necesarios para los ensayos; sus cantidades y el costo total de ellos en relación a la duración de la investigación.
- Se adquirieron dichos elementos para ser armados y ensamblados para el montaje formal del reactor.

5.2 Fase 2

Se Establecieron los parámetros operativos adecuados para poner en marcha la planta piloto a escala laboratorio del POA –fotofenton- para el lixiviado maduro del Henequén

- En la etapa de prueba, se realizaron 10 corridas con agua, donde se determinaron posibles fugas, volumen interno del reactor, tiempo de retención hidráulica, periodo que toma un litro de muestra en recorrer todo el reactor, potencia y velocidad de la bomba.
- Se hicieron 10 montajes con lixiviado agregando Sulfato Ferroso y Peróxido de Hidrógeno en presencia de luz solar, donde se verificó posibles taponamientos en los tubos por formación de sedimentos, procedimiento correcto para adicionar dichos reactivos y el PH óptimo para la reacción.
- Adicionalmente, se hicieron 10 montajes con lixiviado agregando Sulfato Ferroso y Peróxido de Hidrógeno , pero esta vez utilizando las dos lámparas de rayos UV, donde se verificó igualmente posibles taponamientos en los tubos por formación de sedimentos, procedimiento correcto para adicionar dichos reactivos y su dosificación, determinación del pH óptimo para la reacción y voltaje de las lámparas.
- A partir de la revisión bibliográfica pertinente, se estableció que los parámetros operativos adecuados para poder estudiar las variables principales de concentración óptima de los reactivos es el diseño experimental factorial en tres niveles, definido de la siguiente forma:

Figura 9 Diseño factorial experimental



Fuente: Autor

De acuerdo con diseño experimental existen dos factores, cada uno con tres niveles, lo que hizo necesario la realización de 9 montajes completos en el laboratorio, a partir de allí se definió: tiempo eficiente de operación y concentración óptima de los reactivos para la remoción de los contaminantes presentes en el lixiviado.

5.3 Fase 3

Se determinó la eficiencia de remoción de contaminantes recalcitrantes, en términos de DQO, presentes en el lixiviado maduro del relleno El Henequén utilizando el tratamiento de oxidación avanzada –fotofenton

Para determinar la eficiencia de remoción, se analizaron los 9 resultados en términos de la demanda química de oxígeno (DQO [mg/L] O₂), la cual fue medida con el método colorimétrico a reflujo cerrado con un espectrofotómetro GENESYS 10 que está actualmente en el laboratorio CITA.

6. RESULTADOS

6.1 Montaje

Se construyó el montaje para realizar las pruebas planteadas con el tratamiento fisicoquímico utilizando radiación ultravioleta con el fin de excitar las moléculas dándoles luz artificial. El lixiviado se acumuló en un Beaker, en el cual se aplicaron los reactivos (sulfato ferroso y el peróxido de hidrogeno) y se bombeó a un serpentín de vidrio de 16 vueltas con el propósito de que el lixiviado esté expuesto la mayor cantidad de tiempo a la radiación ultravioleta , tal como se observa en la Figura 10 y 11.

Figura 10: Serpentín de vidrio



Fuente: Autor

Figura 11: Luz artificial - lámparas UV



Fuente: Autor

Figura 12: Montaje Completo



Fuente: Autor

La tubería de vidrio fue montada sobre una superficie reflectora en forma cóncava que permitiera la concentración de la radiación ultravioleta, a modo de Colector Parabólico Compuesto, CPC, un tipo de colector solar. Este CPC fue hecho con tubería de 1½" cortada por la mitad para darle la forma de colector y recubierta con papel aluminio para darle la superficie reflectora, todo esto se fijó en una tabla de madera para facilitar su manejo.

El montaje se hizo siguiendo los modelos utilizados por otros investigadores (PRATO 2007), éste fue adecuado debido a que permitió que la mayor cantidad de líquido recibiera la radiación ultravioleta, sin embargo, se presentaron problemas a mayores valores de concentración de sulfato, ya que se produjo precipitación y hubo tendencia al taponamiento de ciertos tramos de tubo, por lo que hubo que detener la prueba en algunos momentos para sacar los precipitados y poder continuar. Esto hace pensar en utilizar mayores diámetros de tubería para pruebas en el futuro. Como se muestra en las siguientes figuras:

Figura 13 Precipitado en la solución



Fuente: Autor

Figura 14: Sedimento de la solución



Fuente: Autor

6.2 Parámetros Operativos

La Tabla 12 muestra los parámetros operativos del montaje. Se calcularon en base a la información obtenida de la bibliografía y se utilizaron para lograr mayor tiempo de retención hidráulica y mayor contacto del líquido con la radiación ultravioleta.

Tabla 11: Parámetros del montaje

| PARÁMETROS | DIMENSIONES |
|--------------------------------|-------------|
| Número de tubos | 13 |
| Largo de cada tubo | 30 cm |
| Diámetro externo | 3 mm |
| Diámetro interno | 2 mm |
| Vueltas | 12 |
| Tiempo de retención hidráulica | 8:23 min |
| Volumen del reactor | 75 ml |
| Volumen del Beaker | 1000 ml |
| Caudal | 9 ml/min |
| Horas de exposición a UV | 6 horas |

Fuente: Autor

En promedio, cada hora circula medio litro de lixiviado en el reactor, por tanto, cada dos horas el contenido del Beaker recorre completamente la planta piloto.

Según lo reportado por SILVA et al, 2008, el caudal fue de 80 ml/s, este ensayo se realizó en un reactor con una capacidad volumétrica de 7 L que pasan por un tubo de 86 cm de largo y 1.5 cm de diámetro. Se trabajó con un caudal más pequeño para poder evaluar esta planta a escala laboratorio (Benchscale) a fin de

establecer los parámetros de operación óptimos de dicho proceso. (SILVA et al 2008)

6.3 Evaluación de la Eficiencia

6.3.1 Físicos:

Características organolépticas:

- El Lixiviado presenta cierta cantidad de partículas flotantes de tono café oscuro.
- El color que se puede observar en este líquido es anaranjado oscuro

6.3.2 Fisicoquímicos:

Características químicas del lixiviado:

Se realizó análisis de estos parámetros antes de hacer cada uno de los 9 montajes en la planta piloto.

Tabla 12: Resultados de parámetros fisicoquímicos del lixiviado

| PARÁMETROS | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Muestra 4 | Muestra 5 | Muestra 6 | Muestra 7 | Muestra 8 | Muestra 9 |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Conductividad (us) | 14,49 | 16,1 | 13,4 | 15,45 | 15,07 | 14,83 | 14,53 | 15,76 | 15,56 |
| PH | 7,79 | 7,91 | 7,08 | 7,3 | 7,34 | 7,28 | 7,33 | 7,35 | 7,33 |
| Temperatura (°C) | 29,8 | 24,2 | 24,5 | 25 | 23 | 23,4 | 26,3 | 26 | 26,1 |
| Color (UPC) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Turbiedad (UNT) | 5,7 | 7,6 | 2,2 | 1,86 | 1,52 | 1,35 | 1,32 | 1,25 | 1,98 |
| SDT (g/lt) | 9,11 | 10,1 | 9,61 | 10,05 | 9,99 | 9,95 | 4,68 | 10,05 | 9,88 |
| DQO Inicial | 4600 | 5600 | 3200 | 5120 | 19200 | 12800 | 9600 | 4480 | 4160 |
| DBO Inicial | 60 | 70 | 70 | 150 | 135 | 54,3 | 55 | 60 | 150 |

Fuente: Autor

Los datos mostrados en la tabla se encuentran dentro del margen de resultados obtenidos por otros investigadores que han evaluado el lixiviado maduro del relleno sanitario El Henequén, tal como lo muestra el estudio de SALAZAR Y SAAVEDRA 1987.

Debido a la complejidad del lixiviado y la gran variabilidad de la composición, su caracterización se llevó a cabo a partir de análisis fisicoquímicos, donde se destacan los mostrados en la Tabla 12. Sin embargo, según lo reportado por (PRATO 2007), el análisis que se le puede realizar a este tipo de lixiviados suele ser más extenso. En este caso, el número de parámetros evaluados está sujeto a la relevancia, objetivo y enfoque de la investigación.

6.3.3 Análisis Estadístico

La siguiente Tabla presenta los resultados del análisis estadístico de los datos de alimentación:

Tabla 13: Análisis estadístico

| PARÁMETROS | MAX | MIN | RANGO | MED. ARITMÉTICA | MODA | MEDIANA | DEV. MEDIA | VARIANZA | DEV. ESTANDAR |
|--------------------|-------|------|-------|-----------------|---------------|---------|--------------|-------------|---------------|
| Conductividad (μs) | 16,1 | 13,4 | 2,7 | 15,02111111 | Indeterminada | 15,07 | 1,078888889 | 0,597165432 | 0,772764797 |
| PH | 7,91 | 7,08 | 0,83 | 7,412222222 | 7,33 | 7,33 | 0,497777778 | 0,061506173 | 0,248004381 |
| Temperatura (°C) | 29,8 | 23 | 6,8 | 25,36666667 | Indeterminada | 25 | -4,433333333 | 3,686666667 | 1,920069443 |
| Color (UPC) | 100 | 100 | 0 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| Turbiedad (UNT) | 7,6 | 1,25 | 6,35 | 2,753333333 | Indeterminada | 1,86 | 4,846666667 | 4,58132963 | 2,140404081 |
| SDT (g/lit) | 10,1 | 4,68 | 5,42 | 9,268888889 | Indeterminada | 9,95 | 0,831111111 | 2,718654321 | 1,648834231 |
| DQO Inicial | 19200 | 3200 | 16000 | 7640 | Indeterminada | 5120 | 2520 | 25073777,78 | 5007,372343 |
| DBO Inicial | 150 | 54,3 | 95,7 | 89,36666667 | 150 | 70 | -60,63333333 | 24046933,33 | 4903,767259 |

Fuente: Autor

Los datos mostrados en la Tabla 13 son producto del análisis estadístico de los resultados obtenidos en la Tabla 12. Según lo observado en éste análisis estadístico, se puede decir lo siguiente:

- Los valores de conductividad variaron entre un máximo de 16,1 y un mínimo de 13.4 μS, lo cual indica que es un agua con alta salinidad y que dificultaría cualquier tratamiento biológico.
- El pH tuvo un valor máximo de 7.91 y un mínimo de 7.08 con un rango de 0.83. Esto indica que el pH del lixiviado fue relativamente neutro y estable en el periodo de estudio.
- La temperatura tuvo una variación entre 29.8 °C (m áx.) y 23 °C (min.)
- El color fue de 100 UPC y no mostró variabilidad
- Los valores de turbiedad estuvieron entre los 7.6 y 1.25 UNT
- Los sólidos disueltos totales se encontraron con un valor máximo de 10.1 y mínimo de 4.68 g/Lt. Lo que confirma la alta salinidad de las aguas.

- La DQO inicial mostró un rango de entre 19200 y 3200 en los resultados obtenidos. Estos valores de DQO son altos para un agua residual, casi comportándose como un agua residual industrial.
- La DBO inicial varió entre un valor máximo de 150 y un mínimo de 54.3 en las muestras analizadas. Lo que indica una baja concentración de materia orgánica biodegradable.

Los resultados mostrados en la Tabla 12 son exclusivos de esta investigación, pues en ninguna referencia bibliográfica consultada se encontró un análisis estadístico similar para los parámetros estudiados.

Si se analizan los datos promedios de DBO y DQO y se establece el índice de Biodegradabilidad entonces el resultado sería:

$$\frac{DBO_{5prom}}{DQO_{prom}} = \frac{89.37}{7640} = 0.0117$$

El resultado anterior muestra un índice de Biodegradabilidad muy bajo, lo que confirma que el lixiviado a tratar no es biodegradable, por lo que la aplicación de tratamientos fisicoquímicos es más apropiada, esto justifica el uso oxidación avanzada como posible tratamiento de este tipo de aguas.

El propósito de ésta exploración es verificar el estado individual de cada parámetro, conociendo a modo general sus aspectos estadísticos más relevantes como el valor máximo y mínimo, su rango, el promedio con su desviación media y estándar

6.3.4 Análisis De Correlación de Pearson

Se realizó una prueba de correlación de Pearson y un análisis de regresión lineal utilizando el Software SPSS versión 19 y se observó que con los datos obtenidos no se puede hacer una regresión lineal, lo que indica que no hay una dependencia lineal entre los datos.

Tabla 14: Correlación de Pearson

| Concentración Fe | Concetraión H2O2 | DQO Inicial | DQO Final |
|------------------|------------------|-------------|-----------|
| 5 | 200 | 4600 | 9200 |
| 5 | 300 | 5600 | 15300 |
| 5 | 500 | 3200 | 9600 |
| 27,5 | 200 | 5120 | 60800 |
| 27,5 | 300 | 19200 | 16000 |
| 27,5 | 500 | 12800 | 12800 |
| 50 | 200 | 9600 | 6400 |
| 50 | 300 | 4480 | 32000 |
| 50 | 500 | 4160 | 44800 |

Fuente: Autor

6.3.5 Análisis de regresión lineal

Tabla 15: Análisis de regresión lineal

| Modelo | R | R cuadrado | R cuadrado corregida | Error típ. de la estimación | Estadísticos de cambio | | | | | Durbin-Watson |
|--------|-------------------|------------|----------------------|-----------------------------|------------------------|-------------|-----|-----|------------------|---------------|
| | | | | | Cambio en R cuadrado | Cambio en F | gl1 | gl2 | Sig. Cambio en F | |
| 1 | ,527 ^a | ,278 | -,156 | 20267,82937 | ,278 | ,640 | 3 | 5 | ,621 | 1,802 |

a. Variables predictoras: (Constante), DQOINICIAL, H2O2, Fe
b. Variable dependiente: DQOFINAL

Fuente: Autor

Los valores de R cuadrado y de R cuadrado corregido son muy bajos lo que indica que no se puede hacer un modelo de regresión lineal a partir de los datos obtenidos en el experimento

6.3.6 Correlación de Pearson

Tabla 16: Correlación de Pearson

| | | DQOFINAL | Fe | H2O2 | DQOINICIAL |
|------------------------|------------|----------|-------|-------|------------|
| Correlación de Pearson | DQOFINAL | 1,000 | ,376 | -,055 | -,310 |
| | Fe | ,376 | 1,000 | ,000 | ,132 |
| | H2O2 | -,055 | ,000 | 1,000 | -,034 |
| | DQOINICIAL | -,310 | ,132 | -,034 | 1,000 |
| Sig. (unilateral) | DQOFINAL | . | ,159 | ,444 | ,208 |
| | Fe | ,159 | . | ,500 | ,368 |
| | H2O2 | ,444 | ,500 | . | ,465 |
| | DQOINICIAL | ,208 | ,368 | ,465 | . |
| N | DQOFINAL | 9 | 9 | 9 | 9 |
| | Fe | 9 | 9 | 9 | 9 |
| | H2O2 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| | DQOINICIAL | 9 | 9 | 9 | 9 |

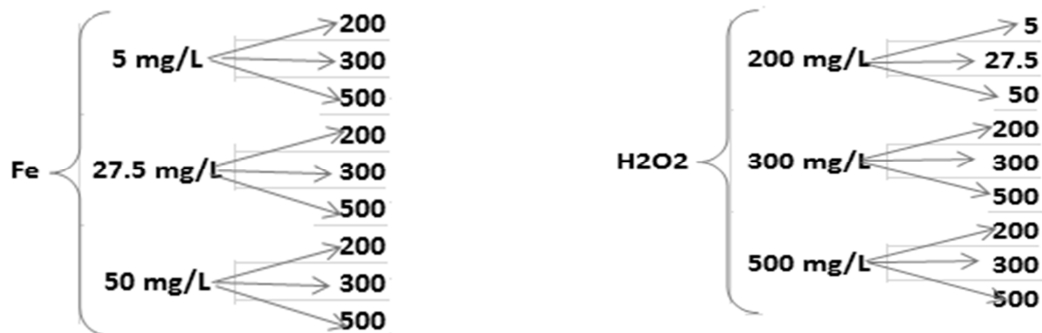
Fuente: Autor

Se observa que ninguno de los valores se acerca a uno, por el contrario son muy pequeños, lo que demuestra que no hay correlación entre los datos.

6.4 Diseño Experimental Factorial

Para encontrar las concentraciones óptimas de Fe^{2+} y H_2O_2 en la degradación de los compuestos orgánicos, se trabajó el diseño de experimental factorial en tres niveles. (Según lo planteado en el diseño metodológico en la fase 2)

Figura 15 Diseño factorial experimental



Fuente: Autor

Las variables de entrada fueron la concentración de hierro y la concentración de peróxido de hidrógeno. El pH se fijó en 2.8. Las concentraciones de Fe variaron entre 5, 27.5 y 50 mg/L y las de H_2O_2 entre 200, 300 y 500 mg/L. Este procedimiento se aplicó de la misma forma por SILVA et al 2008, para evaluar la concentración óptima en este tratamiento.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para evaluar los resultados se presenta la variación de la DQO en el proceso de aplicación del tratamiento de oxidación avanzada, luego se hace el análisis comparativo de las DQO finales obtenida con cada nivel de tratamientos aplicado a los lixiviados para observar con cuál se obtiene los mejores resultados.

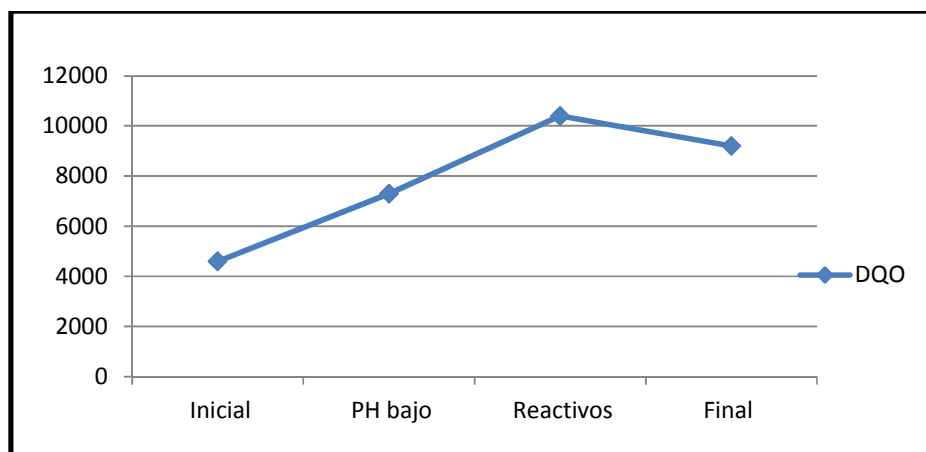
Para la concentración de 5mg/l de Fe y 200 mg/l de H₂O₂:

Tabla 17: Muestra de 5mg/l de Sulfato ferroso y 200mg/l de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado

| Muestras | Inicial | PH bajo | Reactivos | Final |
|--------------------|---------|---------|-----------|-------|
| Conductividad (ms) | 14,49 | 14,63 | 14,72 | 14,86 |
| pH | 7,79 | 2,9 | 3,2 | 6,46 |
| Temperatura (°C) | 29,8 | 28,1 | 27,5 | 24,6 |
| Color (UPC) | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Turbiedad (UNT) | 5,7 | 13,2 | 36,7 | 39,9 |
| SDT (g/l) | 9,11 | 9,21 | 9,53 | 9,62 |
| DQO | 4600 | 7300 | 10400 | 9200 |

Fuente: Autor

Gráfica 1: Muestra de 5mg/lit de Sulfato ferroso y 200mg/lit de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado



Fuente: Autor

En éste nivel de tratamiento se observa que la DQO inicial es 4600 mg/l y va aumentando a medida que se le añaden los reactivos para bajar el pH (DQO= 7300 mg/l) luego se le añade los reactivos de oxidación como la solución de sulfato ferroso y la de peróxido obteniéndose una DQO de 10400 mg/l antes de la aplicación de la luz ultravioleta. Luego de la aplicación de luz ultravioleta se obtuvo una DQO de 9200 mg/l. Se observa que la DQO inicial es menor que la final.

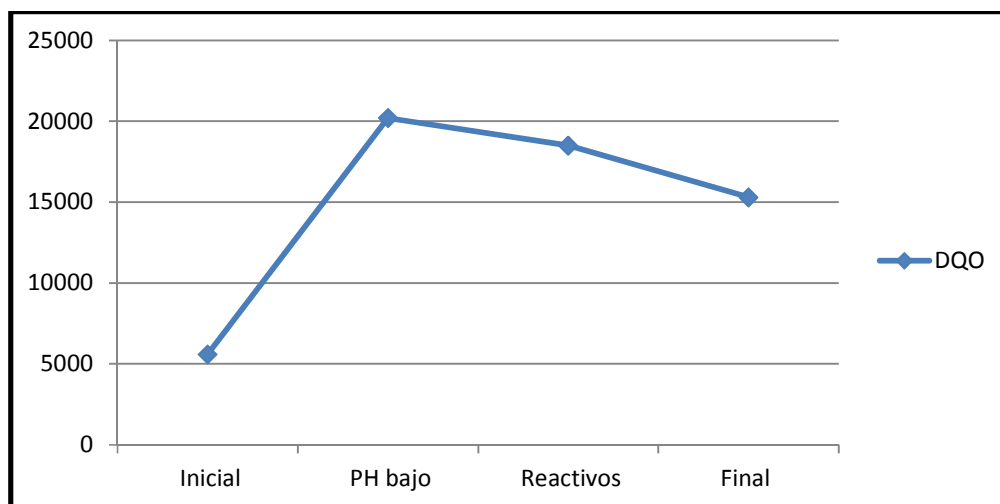
Para la concentración de 5mg/l de Fe y 300 mg/l de H₂O₂:

Tabla 18: Muestra de 5mg/l de Sulfato ferroso y 300mg/l de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado

| Muestras | Inicial | PH bajo | Reactivos | Final |
|--------------------|----------------|----------------|------------------|--------------|
| Conductividad (ms) | 16,1 | 15,9 | 15,2 | 15,24 |
| pH | 7,91 | 2,9 | 3 | 2,8 |
| Temperatura (°C) | 24,2 | 24,9 | 25,1 | 24,2 |
| Color (UPC) | 100 | 100 | 90 | 100 |
| Turbiedad (UNT) | 7,6 | 13,6 | 40,7 | 42,2 |
| SDT (g/l) | 10,1 | 10,03 | 9,9 | 10,2 |
| DQO | 5600 | 20200 | 18500 | 15300 |

Fuente: Autor

Gráfica 2: Muestra de 5mg/lit de Sulfato ferroso y 300mg/lit de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado



Fuente: Autor

En éste nivel de tratamiento se observa que la DQO inicial es 5600 mg/l y va aumentando a medida que se le añaden los reactivos para bajar el pH (DQO= 20200 mg/l) luego se le añade los reactivos de oxidación como la solución de sulfato ferroso y la de peróxido obteniéndose una DQO de 18500 mg/l antes de la aplicación de la luz ultravioleta. Luego de la aplicación de luz ultravioleta se obtuvo una DQO de 15300 mg/l. Se observa que la DQO inicial es menor que la final.

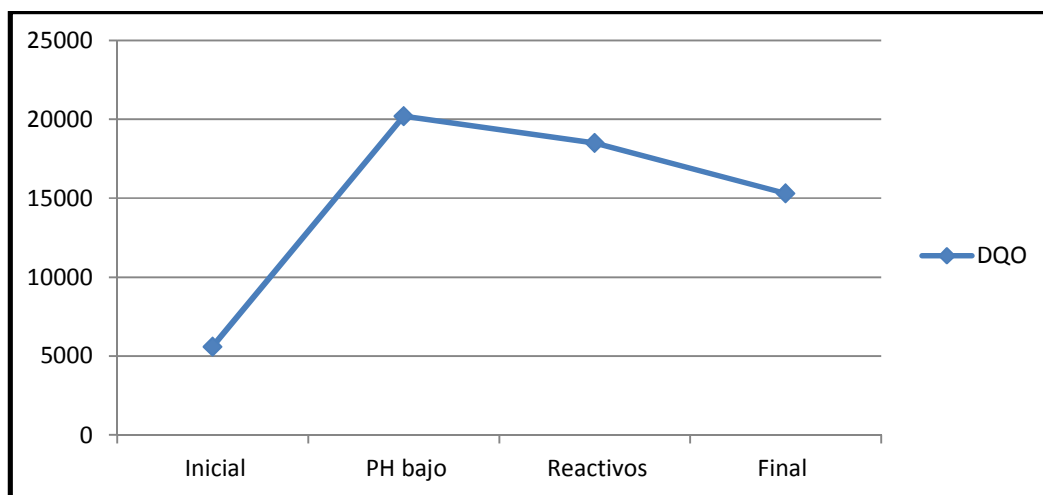
Para la concentración de 5mg/l de Fe y 500 mg/l de H₂O₂:

Tabla 19: Muestra de 5 mg/l de Sulfato ferroso y 500 mg/l de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado

| Muestras | Inicial | PH bajo | Reactivos | Final |
|--------------------|----------------|----------------|------------------|--------------|
| Conductividad (ms) | 13,4 | 13,13 | 14,19 | 14,45 |
| pH | 7,08 | 3,02 | 2,92 | 2,95 |
| Temperatura (°C) | 24,5 | 23,3 | 23 | 23 |
| Color (UPC) | 100 | 70 | 100 | 100 |
| Turbiedad (UNT) | 2,2 | 5,8 | 34,3 | 39,2 |
| SDT (g/l) | 9,61 | 9,01 | 9,86 | 9,93 |
| DQO | 3200 | 16000 | 6400 | 9600 |

Fuente: Autor

Gráfica 3: Muestra de 5 mg/lit de Sulfato ferroso y 500 mg/lit de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado



Fuente: Autor

En éste nivel de tratamiento se observa que la DQO inicial es 3200 mg/l y va aumentando a medida que se le añaden los reactivos para bajar el pH (DQO= 16000 mg/l) luego se le añade los reactivos de oxidación como la solución de sulfato ferroso y la de peróxido obteniéndose una DQO de 6400 mg/l antes de la aplicación de la luz ultravioleta. Luego de la aplicación de luz ultravioleta se obtuvo una DQO de 9600 mg/l. Se observa que la DQO inicial es menor que la final.

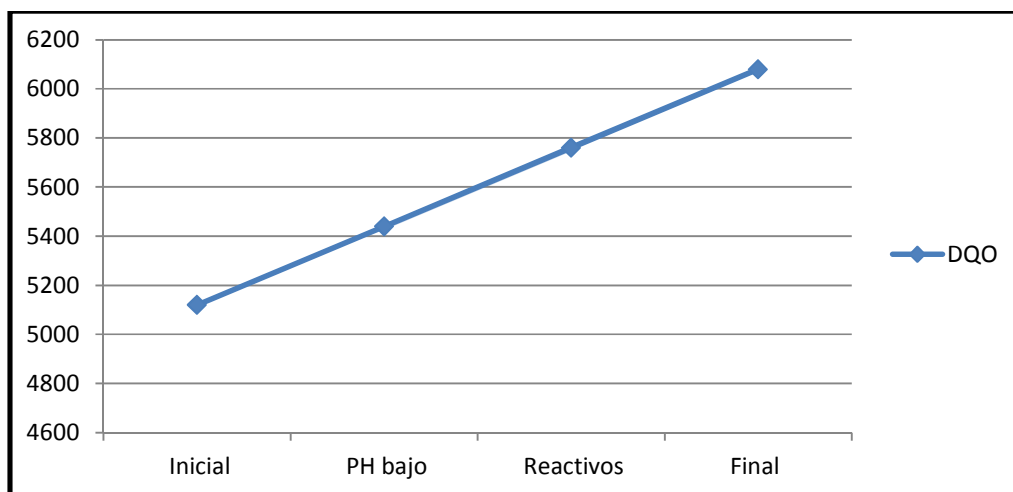
Para la concentración de 27,5mg/l de Fe y 200 mg/l de H₂O₂:

Tabla 20: Muestra de 27,5mg/l de Sulfato ferroso y 200mg/l de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado

| Muestras | Inicial | PH bajo | Reactivos | Final |
|--------------------|----------------|----------------|------------------|--------------|
| Conductividad (ms) | 15,45 | 14,56 | 13,76 | 14,86 |
| pH | 7,3 | 2,99 | 2,97 | 2,99 |
| Temperatura (°C) | 25 | 23 | 23 | 22,5 |
| Color (UPC) | 100 | 60 | 100 | 100 |
| Turbiedad (UNT) | 1,86 | 4,97 | 11,3 | 16,2 |
| SDT (g/l) | 10,05 | 9,84 | 9,88 | 10,17 |
| DQO | 51200 | 54400 | 57600 | 60800 |

Fuente: Autor

Gráfica 4: Muestra de 27,5mg/l de Sulfato ferroso y 200mg/l de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado



Fuente: Autor

En éste nivel de tratamiento se observa que la DQO inicial es 51200 mg/l y va aumentando a medida que se le añaden los reactivos para bajar el pH (DQO= 54400 mg/l) luego se le añade los reactivos de oxidación como la solución de sulfato ferroso y la de peróxido obteniéndose una DQO de 57600 mg/l antes de la aplicación de la luz ultravioleta. Luego de la aplicación de luz ultravioleta se obtuvo una DQO de 60800 mg/l. Se observa que la DQO inicial es menor que la final, aunque el incremento en la DQO no fue tan alto como lo que ocurrió con las muestras donde se aplicó el tratamiento con 5 mg/l de Fe.

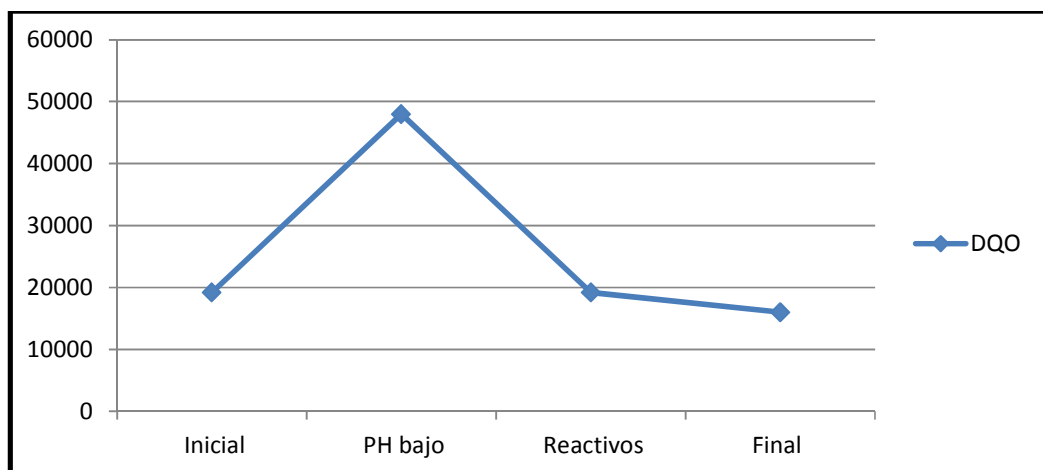
Para la concentración de 27,5mg/l de Fe y 300 mg/l de H₂O₂:

Tabla 21: Muestra de 27,5mg/l de Sulfato ferroso y 300mg/l de Peróxido de Hidrogeno en 1000ml de lixiviado

| Muestras | Inicial | PH bajo | Reactivos | Final |
|--------------------|----------------|----------------|------------------|--------------|
| Conductividad (□s) | 15,07 | 14,24 | 14,69 | 15,02 |
| PH | 7,34 | 3 | 3,12 | 3,09 |
| Temperatura (°C) | 23 | 24 | 24 | 25 |
| Color (UPC) | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Turbiedad (UNT) | 1,52 | 4,52 | 10,5 | 11,5 |
| SDT (g/l) | 9,99 | 9,69 | 9,83 | 9,92 |
| DQO | 19200 | 48000 | 19200 | 16000 |

Fuente: Autor

Gráfica 5: Muestra de 27,5mg/lit de Sulfato ferroso y 300mg/lit de Peróxido de Hidrogeno en 1000ml de lixiviado



Fuente: Autor

En éste nivel de tratamiento se observa que la DQO inicial es 19200 mg/l y va aumentando a medida que se le añaden los reactivos para bajar el pH (DQO= 48000 mg/l) luego se le añade los reactivos de oxidación como la solución de sulfato ferroso y la de peróxido obteniéndose un descenso al valor de DQO de 19200 mg/l antes de la aplicación de la luz ultravioleta. Luego de la aplicación de luz ultravioleta se obtuvo una DQO de 16000 mg/l. Se observa que la DQO inicial es mayor que la final, obteniéndose una remoción de 16,7%.

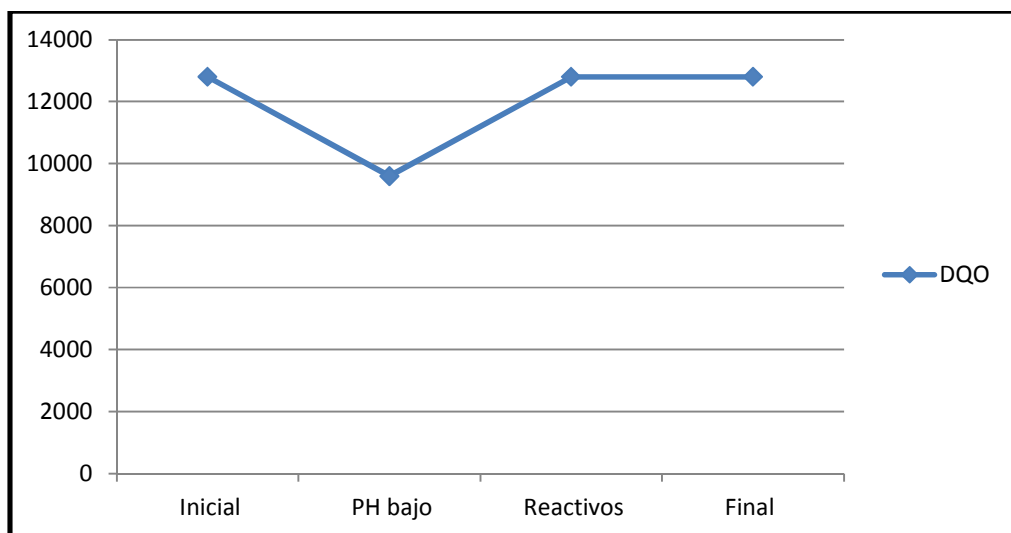
Para la concentración de 27,5mg/l de Fe y 500 mg/l de H₂O₂:

Tabla 22: Muestra de 27,5mg/l de Sulfato ferroso y 500mg/l de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado

| Muestras | Inicial | PH bajo | Reactivos | Final |
|--------------------|----------------|----------------|------------------|--------------|
| Conductividad (□s) | 14,83 | 15,42 | 15,05 | 15,65 |
| PH | 7,28 | 3,07 | 2,96 | 3,02 |
| Temperatura (°C) | 23,4 | 25 | 24 | 25,1 |
| Color (UPC) | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Turbiedad (UNT) | 1,35 | 4,34 | 15,3 | 19,6 |
| SDT (g/l) | 9,95 | 10,04 | 9,98 | 10,17 |
| DQO | 12800 | 9600 | 12800 | 12800 |

Fuente: Autor

Gráfica 6: Muestra de 27,5mg/lit de Sulfato ferroso y 500mg/lit de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado



Fuente: Autor

En éste nivel de tratamiento se observa que la DQO inicial es 12800 mg/l y disminuyó a medida que se le añaden los reactivos para bajar el pH (DQO= 9600 mg/l) luego se le añade los reactivos de oxidación como la solución de sulfato ferroso y la de peróxido obteniéndose un aumento al valor de DQO de 12800 mg/l antes de la aplicación de la luz ultravioleta. Luego de la aplicación de luz ultravioleta se obtuvo una DQO de 12800 mg/l. Se observa que en este nivel de tratamiento la DQO inicial se mantuvo igual que la final.

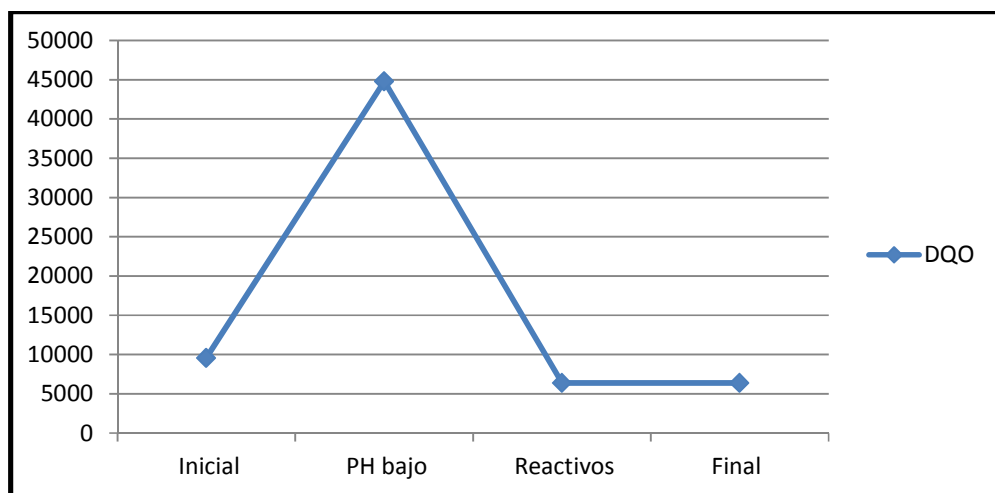
Para la concentración de 50 mg/l de Fe y 200 mg/l de H₂O₂:

Tabla 23: Muestra de 50mg/l de Sulfato ferroso y 200mg/l de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado

| Muestras | Inicial | PH bajo | Reactivos | Final |
|--------------------|----------------|----------------|------------------|--------------|
| Conductividad (□s) | 7,3 | 15,13 | 7 | 15,21 |
| PH | 7,33 | 3,03 | 3,01 | 3,01 |
| Temperatura (°C) | 26,3 | 26,1 | 21,4 | 24 |
| Color (UPC) | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Turbiedad (UNT) | 1,32 | 3,43 | 14,8 | 20,6 |
| SDT (g/l) | 4,68 | 10,13 | 4,8 | 10,15 |
| DQO | 9600 | 44800 | 6400 | 6400 |

Fuente: Autor

Gráfica 7: Muestra de 50mg/lit de Sulfato ferroso y 200mg/lit de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado



Fuente: Autor

En éste nivel de tratamiento se observa que la DQO inicial es 9600 mg/l y aumentó a medida que se le añaden los reactivos para bajar el pH (DQO= 44800 mg/l) luego se le añade los reactivos de oxidación como la solución de sulfato ferroso y la de peróxido obteniéndose una disminución al valor de DQO de 44800 mg/l antes de la aplicación de la luz ultravioleta. Luego de la aplicación de luz ultravioleta se obtuvo una DQO de 6400 mg/l. Se observa que en este nivel de tratamiento la DQO inicial fue mayor que la final, obteniéndose una remoción de 33,3%.

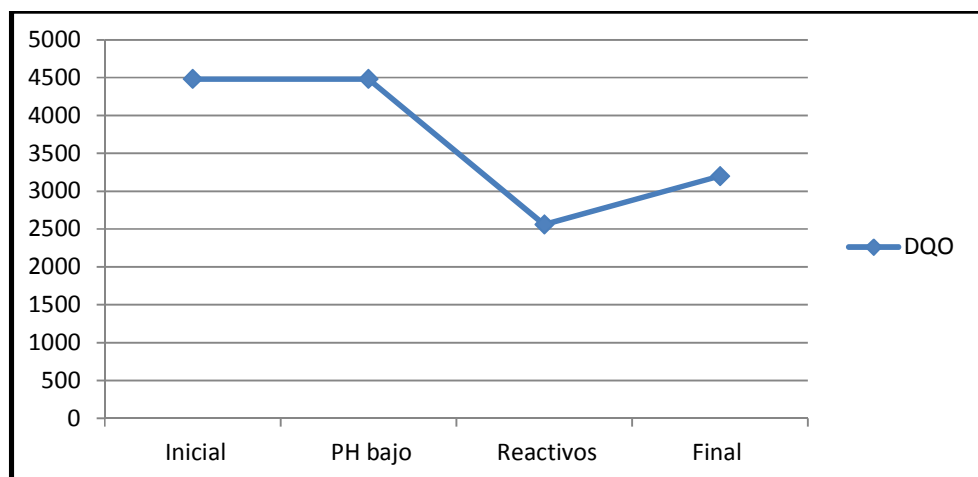
Para la concentración de 50 mg/l de Fe y 300 mg/l de H₂O₂:

Tabla 24: Muestra de 50mg/l de Sulfato ferroso y 300mg/l de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado

| Muestras | Inicial | PH bajo | Reactivos | Final |
|--------------------|----------------|----------------|------------------|--------------|
| Conductividad (□s) | 15,76 | 7,23 | 14,31 | 15,45 |
| PH | 7,35 | 3 | 2,93 | 2,95 |
| Temperatura (°C) | 26 | 24,1 | 22,9 | 24,5 |
| Color (UPC) | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Turbiedad (UNT) | 1,25 | 7,45 | 22,9 | 34,5 |
| SDT (g/lit) | 10,05 | 4,77 | 9,67 | 10,16 |
| DQO | 44800 | 44800 | 25600 | 32000 |

Fuente: Autor

Gráfica 8: Muestra de 50mg/lit de Sulfato ferroso y 300mg/lit de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado



Fuente: Autor

En éste nivel de tratamiento se observa que la DQO inicial es 44800 mg/l y se mantuvo igual a medida que se le añaden los reactivos para bajar el pH (DQO= 44800 mg/l) luego se le añade los reactivos de oxidación como la solución de sulfato ferroso y la de peróxido obteniéndose una disminución al valor de DQO de 25600 mg/l antes de la aplicación de la luz ultravioleta. Luego de la aplicación de luz ultravioleta se obtuvo una DQO de 32000 mg/l. Se observa que en este nivel de tratamiento la DQO inicial fue mayor que la final, obteniéndose una remoción de 28,6%.

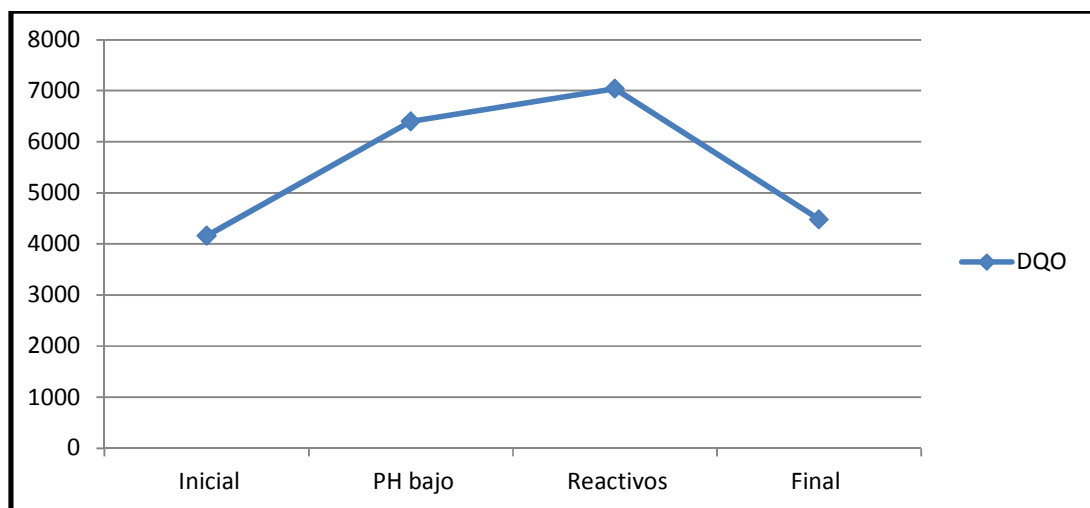
Para la concentración de 50 mg/l de Fe y 500 mg/l de H₂O₂:

Tabla 25: Muestra de 50mg/l de Sulfato ferroso y 500mg/l de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado

| Muestras | Inicial | PH bajo | Reactivos | Final |
|--------------------|----------------|----------------|------------------|--------------|
| Conductividad (□s) | 15,56 | 15,47 | 14,88 | 15,1 |
| PH | 7,33 | 3,01 | 2,98 | 2,99 |
| Temperatura (°C) | 26,1 | 25 | 25 | 23 |
| Color (UPC) | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Turbiedad (UNT) | 1,98 | 5,65 | 27,2 | 32,2 |
| SDT (g/l) | 9,88 | 10,14 | 10,11 | 10,18 |
| DQO | 41600 | 6400 | 70400 | 44800 |

Fuente: Autor

Gráfica 9: Muestra de 50mg/lit de Sulfato ferroso y 500mg/lit de Peróxido de Hidrogeno en 1000 ml de lixiviado

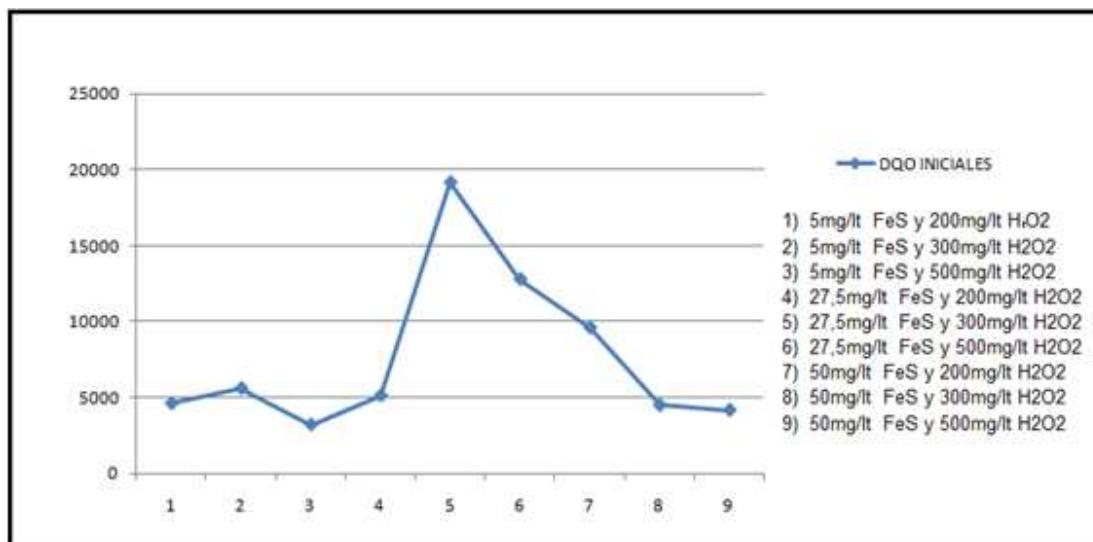


Fuente: Autor

En éste nivel de tratamiento se observa que la DQO inicial es 41600 mg/l y se disminuyó a medida que se le añaden los reactivos para bajar el pH (DQO= 6400 mg/l) luego se le añade los reactivos de oxidación como la solución de sulfato ferroso y la de peróxido obteniéndose una disminución al valor de DQO de 70400 mg/l antes de la aplicación de la luz ultravioleta. Luego de la aplicación de luz ultravioleta se obtuvo una DQO de 44800 mg/l. Se observa que en este nivel de tratamiento la DQO inicial fue ligeramente menor que la final.

7.1 ANÁLISIS GRÁFICO DE RESULTADOS

Gráfica 10: DQO INICIALES



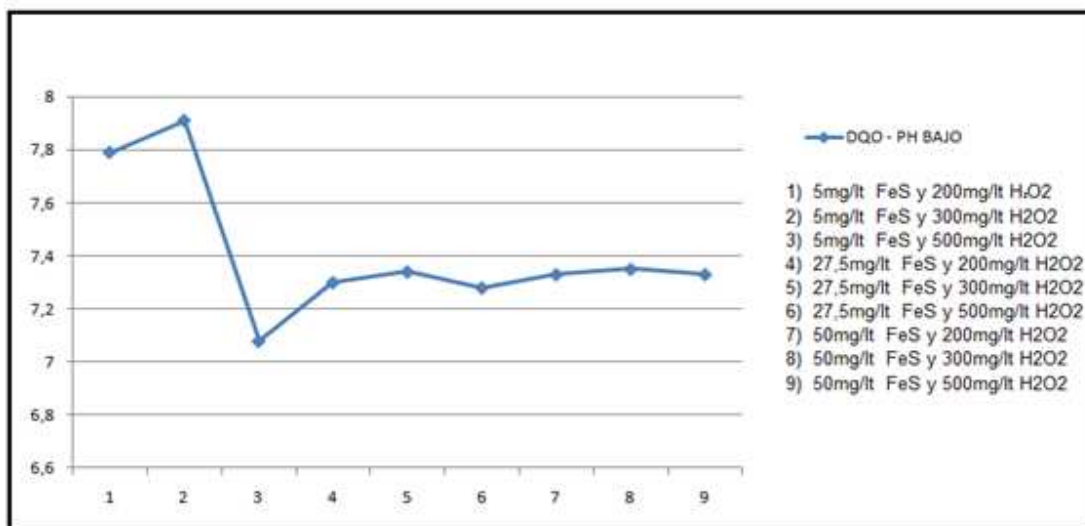
Fuente: Autor

En ésta gráfica, se muestra un resumen de las DQO iniciales que se midieron antes de hacer cada uno de las nueve corridas. Las más altas se obtuvieron en los montajes previos de las concentraciones 5, 6, y 7.

El lixiviado utilizado provino en su totalidad del relleno sanitario el Henequén y se observa la variabilidad del lixiviado en su proceso de formación en el relleno, el cual está afectado por las condiciones ambientales.

Los valores más altos de DQO se dieron en las muestras 5,6 y 7.

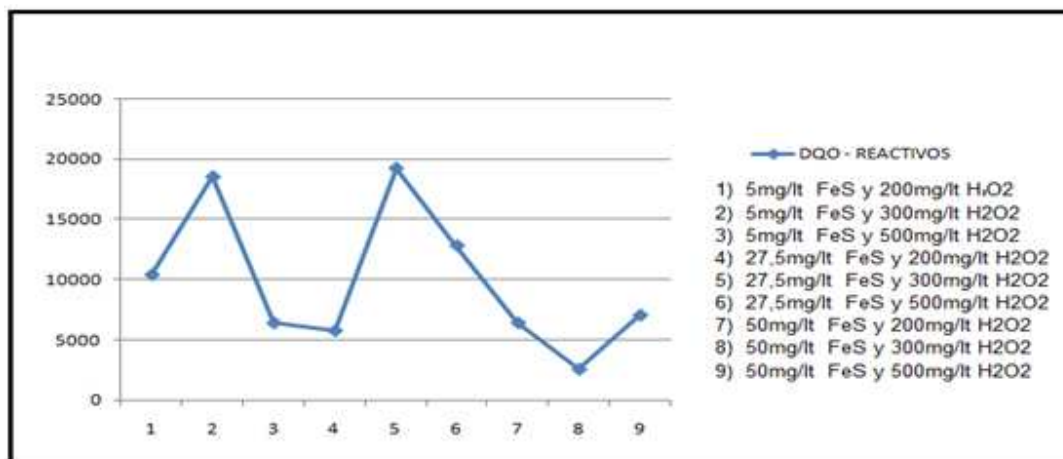
Grafica 11: DQO PH BAJO



Fuente: Autor

En ésta gráfica, se muestra un resumen de las DQO medidas después de agregar ácido sulfúrico (H₂SO₄) al lixiviado para obtener un PH promedio entre 3 y 2.8 y fue medido antes de hacer cada uno de las nueve corridas. Las más altas se obtuvieron en los montajes previos de las concentraciones 5, 6, y 7.

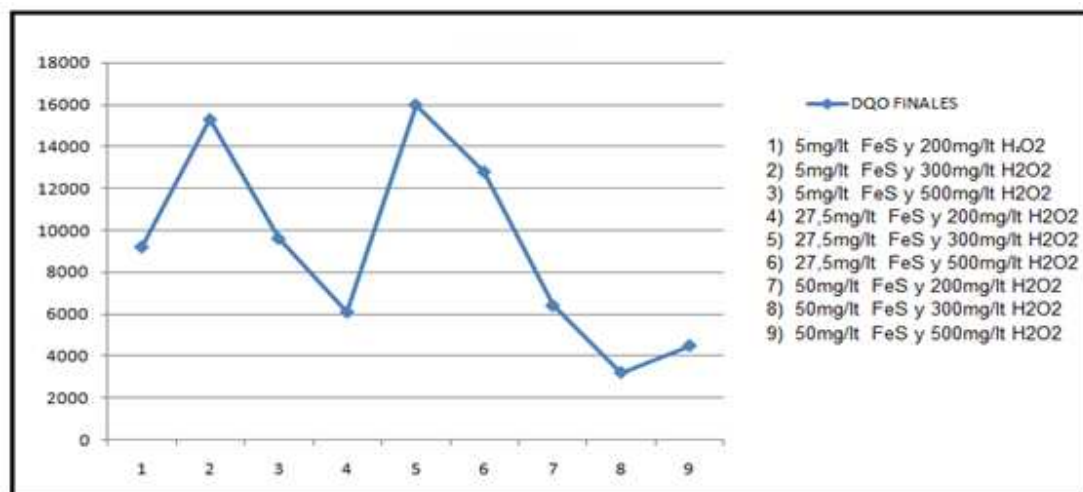
Grafica 12: DQO Reactivos



Fuente: Autor

En ésta gráfica, se muestra un resumen de las DQO medidas después de agregar los reactivos Sulfato Ferroso y Peróxido de Hidrógeno al lixiviado, fueron medidas antes de hacer cada uno de las nueve corridas. Las más altas se obtuvieron en los montajes previos de las concentraciones 2, 5 y 6.

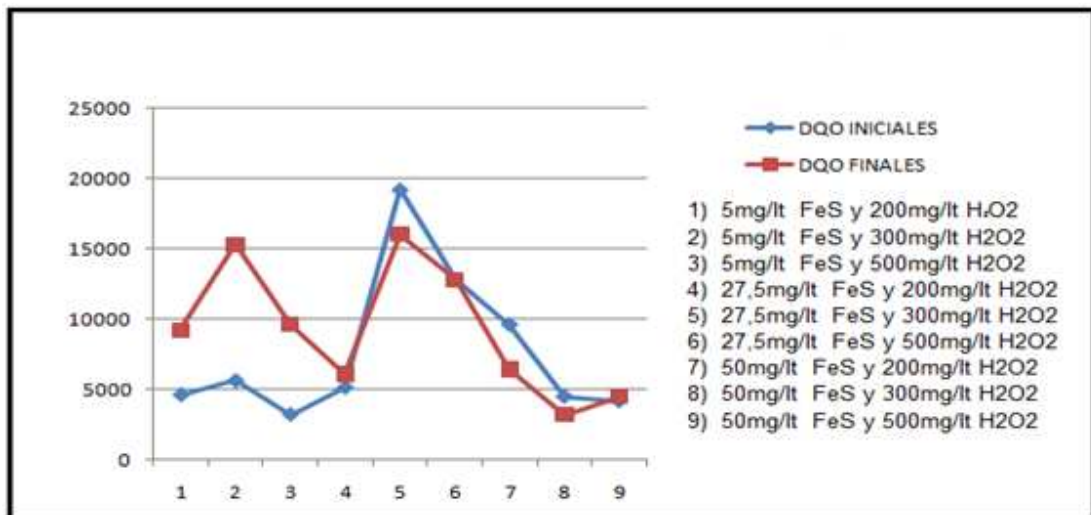
Grafica 13: DQO Finales



Fuente: Autor

En ésta gráfica, se muestra un resumen de las DQO finales que se midieron después de hacer que cada una de las 9 muestras pasara por el reactor con las lámparas UV encendidas. La más baja se obtuvo de la combinación de la concentración de 50 mg/Lt de Fe con 300 mg/Lt de H₂SO₂.

Grafica 14: DQO Iniciales Vs DQO Finales



Fuente: Autor

En ésta gráfica comparativa, se nos muestra más claramente la diferencia que existe entre la DQO medida antes de iniciar el montaje con respecto a los resultados obtenidos para las DQO finales. Se observa claramente que en los tratamientos 5, 7 y 8 hubo remoción de DQO. Cabe resaltar, que la DQO final que presentó mayor remoción de este parámetro con respecto al inicial fue la concentración de 50 mg/l FeS con 200 mg de H₂O₂.

8. CONCLUSIONES

Con relación al trabajo realizado, se puede inferir lo siguiente:

- Se logró construir un reactor a escala laboratorio para realizar el proceso de evaluación para el POA- fotofenton-
- Se consiguió establecer los parámetros operativos adecuados para poner en marcha una planta piloto a escala laboratorio del POA –fotofenton- para el lixiviado maduro del Henequén
- Se pudo determinar la eficiencia de remoción de los contaminantes recalcitrantes, en términos de DQO, presentes en el lixiviado maduro del relleno El Henequén utilizando el tratamiento de oxidación avanzada – fotofenton, obteniéndose una remoción de DQO del 33,3% en el tratamiento con 50 mg/l del Fe y 200 mg/l de H₂O₂.

Durante el desarrollo del proyecto se encontraron las siguientes ventajas respecto a este tratamiento:

- El peróxido de hidrógeno así como el sulfato ferroso, son reactivos seguros, económicos, fáciles de conseguir y sencillos de manejar en comparación con otros reactivos utilizados en tratamientos similares.
- Estos procesos son muy útiles para tratar lixiviados que son altamente contaminantes y que resisten otros métodos de tratamiento, principalmente el biológico.
- Se encontró que después de aplicar el tratamiento se mejoraron significativamente las características organolépticas (color y olor)
- El montaje y mantenimiento de una planta piloto a escala laboratorio que evalúe el tratamiento Foto-Fenton es sencilla de manejar, no requiere materiales costosos y además es eficaz para este tipo de investigaciones.

Según los resultados presentados, se pueden mencionar las siguientes desventajas

- Si existen otros compuestos en el lixiviado capaces de absorber radiación UV y/o una alta turbidez, sucede lo mismo que ocurre al disminuir el flujo de radiación incidente, es decir, hay menos radiación disponible para la reacción o la cantidad de radiación transformada en radicales OH es menor.
- El tratamiento no es capaz de lograr una completa mineralización de todos los contaminantes orgánicos, pero si un incremento de la biodegradabilidad. Algunos de los compuestos que pueden incidir en la resistencia a la

reacción son: ácidos orgánicos de cadena corta (acético, oxálico, fórmico, maleico, fumárico), algunos aldehídos, cloroformo y acetona.

- El proceso requiere un estricto control del pH.
- Este sistema es capaz de alcanzar la mineralización completa de muchos compuestos. Pero presenta desventajas al momento de ponerlo a funcionar a mayor escala, ya que es difícil conseguir alcanzar una radiación uniforme en toda la superficie del catalizador
- El tratamiento con Foto Fenton, en general, implica elevados costes si los comparamos con tratamientos de tipo biológico. Estos procesos de oxidación emplean altas cantidades de reactivos y si se le adiciona el hecho de utilizar radiación artificial, el consumo de energía implica un aumento más en los costos.

Para próximas investigaciones relacionadas a este proceso, se realizan las siguientes recomendaciones:

- Existe la posibilidad de obtener la radiación de una fuente de energía renovable como la radiación solar, fomentando el empleo de procesos más sostenibles.
- Se recomienda hacer pruebas adicionales para verificar otros niveles de tratamiento con estos reactivos (diseño factorial) e incluso utilizar otras sustancias oxidantes tales como Dióxido de Titanio TiO_2 .

GLOSARIO

ABSORCIÓN DE LUZ: es la cantidad de luz que un cierto volumen de agua puede absorber con el tiempo.

ACIDEZ: es la capacidad cuantitativa del agua de neutralizar una base, expresada en equivalente de carbonato de calcio en PPM o del mg/l. El número de los átomos de hidrógeno que están presente determina esto. Es medido generalmente por medio de una valoración con una solución de hidróxido sódico estándar.

AEROBIO: un proceso que ocurre en presencia del oxígeno, tal como la digestión de la materia orgánica por las bacterias en un proceso de oxidación.

AGUA RESIDUAL: es el residuo líquido transportado por una alcantarilla, el cual puede incluir descargas domésticas industriales, así como también aguas lluvias, infiltraciones y flujos de entrada. Agua que ha recibido un uso y cuya calidad ha sido degradada por la

AGENTE CONTAMINANTE: toda aquella sustancia cuya incorporación a un cuerpo de agua conlleve el deterioro de la calidad física, química o biológica

AGENTES CONTAMINANTES BIODEGRADABLES: agentes contaminantes que son capaces de ser descompuestos bajo condiciones naturales.

ANAEROBIO: un proceso que ocurre en ausencia de oxígeno, tal como la digestión de la materia orgánica por las bacterias en un UASB-reactor.

BACTERIAS: pequeños microorganismos unicelulares, que se reproducen por la fisión de esporas.

CATÁLISIS: química que incrementa el ratio de la reacción pero no forma parte directa de dicha reacción, por lo tanto permanece intacta después de que la reacción tenga lugar.

CAUDAL: volumen de agua por unidad de tiempo.

CONCENTRACIÓN: es la cantidad de material disuelto en una unidad de solución, expresado en mg/L.

CONTAMINACIÓN: es un término general que significa la introducción al agua de microorganismos, que hacen el agua impropia al consumo humano, generalmente se considera que implica la presencia o posible presencia de bacterias patógenas.

CUERPO RECEPTOR: es todo aquel manantial, zonas de recarga, río, quebrada, arroyo permanente o no, lago, laguna, marisma, embalse natural o artificial, estuario, manglar, tubería, pantano, agua dulce, salobre o salada, donde se vierten aguas residuales

DBO (Demanda Biológica de Oxígeno): es la cantidad de oxígeno (medido en el mg/l) que es requerido para la descomposición de la materia orgánica por los organismos unicelulares, bajo condiciones de prueba. Se utiliza para medir la cantidad de contaminación orgánica en aguas residuales.

DBO₅: es la cantidad de oxígeno disuelto consumido en cinco días por las bacterias que realizan la degradación biológica de la materia orgánica.

DQO (Demanda Química de Oxígeno): es la cantidad de oxígeno (medido en mg/L) que es consumido en la oxidación de materia orgánica y materia inorgánica oxidable, bajo condiciones de prueba. Es usado para medir la cantidad total de contaminantes orgánicos presentes en aguas residuales. En contraposición al BOD, con el DQO prácticamente todos los compuestos son oxidados.

DESCARGA: es la liberación de contaminantes que fueron capturados por un medio de filtración.

DESCOMPOSICIÓN: la ruptura de la materia orgánica por bacteria y fungi, para cambiar la apariencia de la estructura química y física de la materia orgánica.

DISPOSICIÓN FINAL: es el punto de descarga final del agua que ha sido tratada anteriormente.

EFLUENTE DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO: es el caudal que sale de la última unidad de tratamiento.

LIXIVIACIÓN: es el proceso por el cual constituyentes solubles son disueltos y filtrado a través del suelo por la precolación del fluido.

LIXIVIADO: agua producto de la degradación de la materia que contiene sustancias sólidas en solución después de percolar a través de un filtro o al suelo.

OXIDACIÓN: reacción química en la cual los iones transfieren los electrones, para incrementar la valencia positiva.

OXIDACIÓN AVANZADA: uno de varios procesos de oxidación combinados. Procesos de oxidación química avanzados que usan oxidantes (químicos) para reducir los niveles de COD/BOD, y para eliminar compuestos inorgánicos y orgánicos oxidables. Los procesos pueden oxidar totalmente los materiales orgánicos a dióxido de carbono y agua, aunque no es a menudo necesario hacer funcionar los procesos a este nivel de tratamiento.

OXIDACIÓN BIOLÓGICA: descomposición de materiales orgánicos complejos por microorganismos a través de la oxidación.

OXIDACIÓN ULTRAVIOLETA: un proceso que usa longitud de onda extremadamente corta que puede matar microorganismos (desinfección) o partir moléculas orgánicas (foto oxidación) dejándolas polarizadas o ionizadas y así son eliminadas más fácilmente del agua.

PARÁMETRO: una variable, propiedad medible cuyo valor está determinado por las características del sistema en el caso del agua por ejemplo, estas pueden ser la temperatura, la presión, la densidad, etc.

PLANTA DE TRATAMIENTO: una estructura construida para tratar el agua residual antes de ser descargada al medio ambiente.

RESIDUOS SÓLIDOS: subproductos generados por la utilización de materiales sólidos

SISTEMA DE TRATAMIENTO: conjunto de operaciones y procesos físicos, químicos y/o biológicos, cuya finalidad es depurar la calidad del agua residual a la que se aplican.

TRATAMIENTO PRIMARIO: el tratamiento de aguas residuales urbanas mediante un proceso físico o físico-químico que incluya la sedimentación de sólidos en suspensión, u otros procesos en los que la DBO5 de las aguas residuales que entren, se reduzca, por lo menos en un 50%.

TRATAMIENTO SECUNDARIO: el tratamiento de aguas residuales urbanas mediante un proceso que incluya un tratamiento biológico con sedimentación secundaria u otro proceso, en el que se respeten los requisitos que se establecerán reglamentariamente.

TRATAMIENTO ADECUADO: el tratamiento de las aguas residuales urbanas mediante cualquier proceso o sistema de eliminación, en virtud del cual las aguas receptoras cumplan después del vertido, los objetivos de calidad previstos en el ordenamiento jurídico aplicable.

UV (ULTRA VIOLETA). Radiación que contiene una longitud de onda menor que la luz visible. Es a menudo usada para matar bacterias y romper el ozono.

VIDA UTIL: es el periodo de tiempo que las estructuras realizan su función en un 100%.

BIBLIOGRAFIA

- BRAIG, S, COULOMB, I, COURANT, P, LIECHTI, P. (1999).Treatment of landfill leachates: lapeyrouse and satrod case studies. Ozone Science & Engineering. Pág. 21.
- BRILLAS, E. CALPE, J.C, CASADO, J. (2000) Mineralization of 2, 4-D by advanced Electrochemical Oxidation Processes. Wat Res. Pág. 34.
- CASADO, J, FORNAGUERA, J, GALAN, MI. (2005).Mineralization of aromatics in water by sunliht-assisted electro-Fenton technology in a pilot reactor. Environ scitechonol. Pag.39.
- CHACON, Juan, LEAL, Teresa, BANDALA, Erick, SANCHEZ, Manuel (2007). Mineralización de colorantes por foto-fenton y energía solar. En: instituto mexicano de tecnología de agua.
- COPA; J, MEIDL, A. (1986).Powered carbon effectively treats toxic leachate. Pollution Engineering. Pág. 18
- DE LAAT, J, TRUONG, Le, LEGUBE, B. A.(2004).comparative study of the effect of chloride, sulfate and nitrate ion son the rates of decomposition of H_2O_2 and organic compounds by $Fe(II)$ / H_2O_2 and $Fe(III)$ / H_2O_2 . Chemosphere. Pág. 55.
- DIAMADOPOLOUS, E. (1994). Caracterización and treatment of recirculation-stabilized leachate. Water research. 1994. Pag.28.
- DOMENECH, X, JARDIM, W, LITTER, N. (2002). Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. Solar safe wáter. 2002.
- ESPULGAS, S, GIMENEZ, J, CONTRERAS, S, PASCUAL, E, RODRIGUEZ, M. (2002). Comparison of different advanced oxidation processes for phenol degradation. Water research. Pág. 16.
- FENG, H, LE, cheng. (2003). Degradation kinetic and mechanism of phenol in photofenton process. Journal of Zheijian University, science.
- FORERO, Jorge Enrique, ORTIZ, Olga Patricia y RIOS, Fabián (2005). Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol de aguas residuales industriales de refinería. Bucaramanga, Santander, Colombia. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleo, Vol. 3

- GLAZE, W, KANG, W, CHAPIN, H. (1987). The Chemistry of Water Treatment Processes Involving Ozone, Hydrogen Peroxide And Ultraviolet Radiation. Ozone Sci. & Eng. Pág. 335.
- NTC 1486: 2008, Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grados y otros trabajos de investigación.
- NTC 5613: 2008, Referencias bibliográficas. Contenido, formas y estructura.
- OSSA PARRA, Marcela (2006). Cartilla de citas, pautas para citar textos y hacer listas de referencias. Primera edición Bogotá D.C. Universidad de los Andes.
- PRATO (2007) Tratamiento de aguas residuales industriales fenólicas sintéticas mediante procesos avanzados de oxidación. México D.F. Universidad Iberoamericana. Departamento de Ingeniería Química.
- PRIMO (2008). Mejoras en el tratamiento de lixiviado de vertedero de RSU mediante procesos de oxidación avanzada. España. Universidad de Cantabria, Escuela Técnica superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones, Departamento de Ingeniería Química y Química Inorgánica.
- SALAZAR GAMEZ, Lorena Lucia, SAAVEDRA ANTOLINEZ, Inés María (2009). Tratamiento de lixiviado, casos prácticos en diferentes temperaturas. Barranquilla, Colombia. Universidad del Norte, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.
- SILVA, Sandra, TRUJILLO, Julián, AGUILAR, Guillermo, HINCAPIE, Margarita (2008). Tratamientos de contaminantes orgánicos por foto fenton con luz artificial. En: Revista Ingenierías Universidad de Medellín.
- URKIAGA GUINEA, GOMEZ RESA, GUTIERREZ RUIZ. (2007) Aplicación de procesos de oxidación avanzada al tratamiento de efluentes de diferentes sectores industriales. Centro Tecnológico, Parque tecnológico.

ANEXOS

ANEXO 1

CARTA DE ENTREGA Y AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA LA CONSULTA, LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO DE TESIS Y TRABAJOS DE GRADO

Barranquilla, 14 de Enero de 2013

Marque con una X
Tesis ☐ Trabajo de Grado ☒

Yo, ANGÉLICA TATIANA OTERO ROZO, identificado con C.C. No. 1045672200, actuando en nombre propio y como autor de la tesis y/o trabajo de grado titulado DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO DEL LIXIVIADO MADURO DEL RELLENO EL HENEQUÉN TRATADO CON OXIDACIÓN AVANZADA FOTO-FENTON presentado y aprobado en el año 2012 como requisito para optar al título de INGENIERA AMBIENTAL;

hago entrega del ejemplar respectivo y de sus anexos de ser el caso, en formato digital o electrónico (DVD) y autorizo a la UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC, para que en los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia, utilice y use en todas sus formas, los derechos patrimoniales de reproducción, comunicación pública, transformación y distribución (alquiler, préstamo público e importación) que me corresponden como creador de la obra objeto del presente documento.

Y autorizo a la Unidad de información, para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad de la Costa, CUC, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en la página Web de la Facultad, de la Unidad de información, en el repositorio institucional y en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la institución y Permita la consulta, la reproducción, a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato DVD o digital desde Internet, Intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

El AUTOR - ESTUDIANTES, manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y la realizó sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es de su exclusiva autoría y detenta la titularidad ante la misma. PARÁGRAFO: En caso de presentarse cualquier reclamación o acción

por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, EL ESTUDIANTE - AUTOR, asumirá toda la responsabilidad, y saldrá en defensa de los derechos aquí autorizados; para todos los efectos, la Universidad actúa como un tercero de buena fe.

Para constancia se firma el presente documento en dos (02) ejemplares del mismo valor y tenor, en Barranquilla D.E.I.P., a los 11 días del mes de Enero de Dos Mil Trece 2013.

EL AUTOR - ESTUDIANTE._____

FIRMA

ANEXO 2

FORMULARIO DE LA DESCRIPCIÓN DE LA TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO

TÍTULO COMPLETO DE LA TESIS O TRABAJO DE GRADO:

Determinación de la eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno del lixiviado maduro del relleno el henequén tratado con oxidación avanzada foto-fenton

SUBTÍTULO, SI LO TIENE:

AUTOR AUTORES

| Apellidos Completos | Nombres Completos |
|---------------------|-------------------|
| OTERO ROZO | ANGELICA TATIANA |

DIRECTOR (ES)

| Apellidos Completos | Nombres Completos |
|---------------------|-------------------|
| | |

JURADO (S)

| Apellidos Completos | Nombres Completos |
|---------------------------------|-------------------|
| LOZANO AYARZA CANTERO RODELO | LILIANA RUBEN |

ASESOR (ES) O CODIRECTOR

| Apellidos Completos | Nombres Completos |
|---------------------|-------------------|
| BERNAL HIGUITA | FAISAL |

TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniera Ambiental**FACULTAD:** Ciencias Ambientales**PROGRAMA:** Pregrado ☒ Especialización ☐**NOMBRE DEL PROGRAMA** Ingeniería Ambiental**CIUDAD:** Barranquilla **AÑO DE PRESENTACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO:**
2012**NÚMERO DE PÁGINAS:** 117**TIPO DE ILUSTRACIONES:**

- | | |
|--|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> Ilustraciones | <input checked="" type="checkbox"/> Planos |
| <input type="checkbox"/> Láminas | <input type="checkbox"/> Mapas |
| <input type="checkbox"/> Retratos | <input checked="" type="checkbox"/> Fotografías |
| <input checked="" type="checkbox"/> Tablas, gráficos y diagramas | |

MATERIAL ANEXO (Vídeo, audio, multimedia o producción electrónica):

Duración del audiovisual: _____ minutos.

Número de casetes de vídeo: _____ Formato: VHS _____ Beta Max $\frac{3}{4}$ _____

Beta Cam _____ Mini DV _____ DV Cam _____ DVC Pro _____ Vídeo 8 _____ Hi 8 _____

Otro. Cuál? DVD

Sistema: Americano NTSC _____ Europeo PAL _____ SECAM _____

Número de casetes de audio: _____**Número de archivos dentro del DVD** (En caso de incluirse un DVD diferente al trabajo de grado): _____**PREMIO O DISTINCIÓN** (En caso de ser LAUREADAS o tener una mención especial): _____

DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS: Son los términos que definen los temas que identifican el contenido. (*En caso de duda para designar estos descriptores, se recomienda consultar con la Unidad de Procesos Técnicos de la Unidad de información en el correo biblioteca@cuc.edu.co, donde se les orientará*).

ESPAÑOL

INGLÉS

| | |
|--|--|
| | |
| | |
| | |

RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS:(Máximo 250 palabras-1530 caracteres):

ESPAÑOL:

Este proyecto está enfocado a plantear una opción de tratamiento alternativo que permita minimizar el efecto contaminante de los lixiviados generados por la continua degradación de los residuos sólidos alojados en el ya clausurado relleno sanitario el Henequén, implementando uno de los procesos de oxidación avanzada de foto-degradación sensibilizada (Foto-Fenton), usando luz ultravioleta artificial como fuente de radiación para promover la aceleración de la mineralización de los compuestos y dichos resultados serán evaluados para determinar la eficiencia de remoción de los contaminantes en términos de la Demanda Química de Oxígeno DQO

Palabras clave: Tratamiento, contaminante, lixiviados, residuos, relleno sanitario, oxidación avanzada, Foto-fenton, luz ultravioleta, eficiencia, remoción, DQO.

INGLES:

This project aims to raise an alternative treatment option that minimizes the polluting effect of leachate generated by the continuing degradation of solid waste housed in the now closed landfill El Henequen, implementing one of the advanced oxidation processes of photo-sensitized degradation (photo-Fenton), using artificial ultraviolet radiation source to promote the acceleration of the mineralization of the compounds and these results will be evaluated to determine the removal efficiency of pollutants in terms of Chemical Oxygen Demand COD

Keywords: treatment, contaminant, leachate, waste, landfill, advanced oxidation, photo-Fenton, UV light, efficiency, removal, COD.